

## Balanco de emissões de CO<sub>2</sub> por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas



CGPE 10009

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Soja  
Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento***

# ***Documentos 334***

**Balanco de emissões de CO<sub>2</sub>  
por biocombustíveis no Brasil:  
histórico e perspectivas**

*Décio Luiz Gazzoni*  
Autor

Embrapa Soja  
Londrina, PR  
2012

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Soja**

Endereço: Rod. Carlos João Strass, s/n, acesso Orlando Amaral,  
CEP 86001-970, C.Postal 231, Distrito da Warta, Londrina, PR.

Fone: (43) 3371 6000

Fax: (43) 33716100

E-mail: sac@cnpso.embrapa.br

**Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: José Renato Bouças Farias.

Secretário-Executivo: Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros: Alvadi Antonio Balbinot Junior, Claudine Dinali Santos Seixas, Claudio Guilherme

Portela de Carvalho, Décio Luiz Gazzoni, Francismar Correa Marcelino-Guimarães, Marcelo

Alvares de Oliveira, Maria Cristina Neves de Oliveira e Norman Neumaier.

Supervisão editorial: Vanessa Fuzinatto Dall´Agnol

Normalização bibliográfica: Ademir Benedito Alves de Lima

Editoração eletrônica: Vanessa Fuzinatto Dall´Agnol

Foto e arte da capa: Bruno Gazzoni

**1ª edição**

Versão *On-line*(2012)

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Embrapa Soja**

---

Gazzoni, Décio Luiz

Balanço de emissões de dióxido de carbono por biocombustíveis no Brasil:  
histórico e perspectivas / Décio Luiz Gazzoni. – Londrina: Embrapa Soja, 2012.

102 p. (Documentos/ Embrapa Soja, ISSN : 2176-2937 ; n.334).

1.Combustível. 2.Biocombustível. I.Título. II.Série.

CDD: 662.6 (21.ed).

---

© Embrapa 2012

# Autor

**Décio Luiz Gazzoni**

Engenheiro Agrônomo, M.Sc.

pesquisador da Embrapa Soja

Londrina, PR

deciolg@cnpso.embrapa.br

# Apresentação

Nos últimos 40 anos, a demanda mundial de energia cresceu quase 80%, aproximadamente o mesmo quantitativo estimado para o incremento da demanda nos próximos 40 anos. O suprimento da demanda adicional do passado ocorreu com o uso crescente de fontes fósseis de energia, como petróleo, carvão mineral e gás. Essas fontes, que atualmente respondem por mais de 80% da oferta primária de energia no plano global, permitiram o atendimento da demanda, salvo percalços pontuais de percurso, como as crises de abastecimento conhecidas como primeiro e segundo choque do petróleo, ocorridas na década de 1970, e que elevaram acentuadamente os preços do petróleo, arrastando consigo as cotações das outras fontes.

Entretanto, não necessariamente as mesmas fontes que atenderam a demanda adicional do passado serão úteis para ofertar a necessidade de energia incremental para o futuro. Esta consideração possui um forte componente ambiental, pois se, por um lado, as fontes fósseis atenderam a necessidade global de energia, por outro posicionaram-se no epicentro de uma das maiores controvérsias ambientais do momento, com enorme potencial de impactos negativos no futuro, em função das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mormente o gás carbônico, para a atmosfera terrestre.

Conforme os relatos do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), o uso de fontes fósseis de energia, em especial no setor de transporte e de geração de eletricidade, constituem-se na principal fonte emissora de GEE. De acordo com os cientistas do IPCC, a elevação da concentração de gás carbônico e outros gases de efeito estufa na atmosfera é a causa central das mudanças climáticas globais, com profundas consequências sociais e ambientais, e impactos particularmente sensíveis no agronegócio.

# Sumário

O Brasil, tradicionalmente, possui a matriz de energia mais limpa entre os países que são grandes consumidores mundiais. Até recentemente, a renovabilidade da matriz era garantida pela geração hidroelétrica. Porém, recentemente, o forte avanço da biomassa na produção de biocombustíveis (etanol e biodiesel) e bioeletricidade tornaram este segmento o segundo mais importante na oferta de energia primária no Brasil, abaixo do petróleo. No início desta década, de acordo com o Balanço Energético Nacional, o índice de renovabilidade da matriz energética brasileira atingiu 47%, o que confere ao nosso país posição de destaque no cenário internacional, em um contexto em que o mundo persegue fórmulas factíveis de desenvolvimento sustentável. Os vetores fundamentais desta conquista foram o estado da arte da tecnologia e as políticas públicas de incentivo à produção e uso de energia renovável.

O presente estudo teve dois objetivos principais. O primeiro deles foi estimar as emissões de GEE efetivamente verificadas entre os anos de 2000 e 2011. O segundo objetivo foi prospectar o balanço de emissões, em função da variação de cenários futuros, contemplando maior ou menor agressividade no desenvolvimento tecnológico e nas políticas públicas de incentivo à energia renovável.

Com esta publicação, a Embrapa Soja pretende contribuir para o debate acerca da importância da energia renovável para o atendimento da demanda brasileira, em um contexto de redução das emissões de GEE, demonstrando a variação destas emissões em virtude do apoio conferido às atividades de PDI setorial e em decorrência das políticas públicas para o setor.

*Alexandre José Cattelan*  
Chefe Geral da Embrapa Soja

<b>Balanço de emissões de CO<sub>2</sub> por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>9</b>
1.1. Antecedentes .....	9
1.2. Ações futuras .....	13
<b>2. Emissões globais dos combustíveis .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Emissões de gases de efeito estufa no Brasil.....</b>	<b>22</b>
3.1. Emissões totais.....	22
3.2. Emissões do setor de transportes no Brasil .....	24
<b>4. Frota de veículos e consumo de combustíveis no Brasil .....</b>	<b>38</b>
<b>5. Emissões dos biocombustíveis .....</b>	<b>48</b>
5.1. Estudos de ciclo de vida e parâmetros utilizados.....	52
5.2. Resultados de emissões do etanol anidro e hidratado.....	58
5.3. Emissões do biodiesel .....	62
5.4. Projeção de emissões no período 2012-2020 .....	64
<b>6. Considerações finais e conclusões .....</b>	<b>78</b>
<b>Referências .....</b>	<b>88</b>

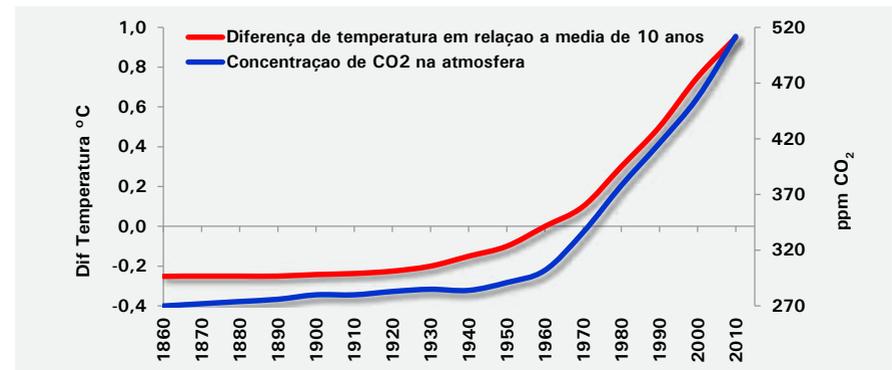
# Balanço de emissões de CO<sub>2</sub> por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas

Décio Luiz Gazzoni

## 1. Introdução

### 1.1. Antecedentes

Em meados da década de 1970 diversos grupos científicos emitiram alertas a respeito de alterações nas concentrações de diferentes gases na atmosfera. Usando o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como paradigma, esta alteração foi relacionada com mudanças em parâmetros climáticos, especialmente na temperatura. Os alertas demonstravam que se encontrava em curso um aquecimento do clima global que não poderia ser justificado por causas naturais e que o fenômeno era devido, em grande parte, às emissões de gases de efeito estufa (GEE) de origem antropogênica. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera em escala global e as mudanças na temperatura média estão apresentadas na Figura 1.



**Figura 1.** Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e modificações na temperatura.  
Fonte: Adaptado de [www.eia.gov.br](http://www.eia.gov.br)

Os avanços na tecnologia de computação possibilitaram o desenvolvimento de modelos complexos e realistas, que permitiram correlacionar as mudanças climáticas com diversas atividades humanas, em especial a queima de combustíveis de origem fóssil, o desflorestamento e as emissões de gases pela agricultura e pecuária. Em 1985, o documento síntese da Conferência de Villach<sup>1</sup> chamou a atenção dos governos para a gravidade do problema.

Anteriormente, em fevereiro de 1979 foi realizada a primeira Conferência Mundial do Clima (WCC) em Genebra, tendo como tema central as Mudanças Climáticas e o Aquecimento Global. A segunda Conferência do Clima também foi realizada em Genebra, em novembro de 1990, mantendo o foco na temática de Mudanças Climáticas e o Aquecimento Global. Ambas as conferências foram organizadas pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO).

Devido à forte fundamentação científica dos resultados apresentados nos eventos científicos, os governos de diversos países endossaram as preocupações e o tema passou a ser tratado oficialmente em foros internacionais, como a própria (WMO e a Organização das Nações Unidas (ONU).

Como resultado destas tratativas, em 1988 foi criado o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), sob os auspícios da WMO e do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNEP). A missão estabelecida para o IPCC é o acompanhamento – de uma forma compreensiva, objetiva, transparente e aberta - e a consolidação das informações científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes para estabelecer, com sólida fundamentação científica, o risco de mudanças climáticas de caráter antropogênico, seus potenciais impactos e as opções para sua mitigação (UNFCCC, 2012a). A Figura 2 ilustra a mudança de patamar de eventos climáticos extremos e seu custo. A linha tracejada representa a análise de tendência exponencial dos eventos em relação ao tempo, com coeficiente de correlação  $r^2 = 0,84$ , indicando o forte aumento ocorrido a partir de meados da década de 1980.

<sup>1</sup> *International Conference on Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts*, Villach, Austria, 1985.

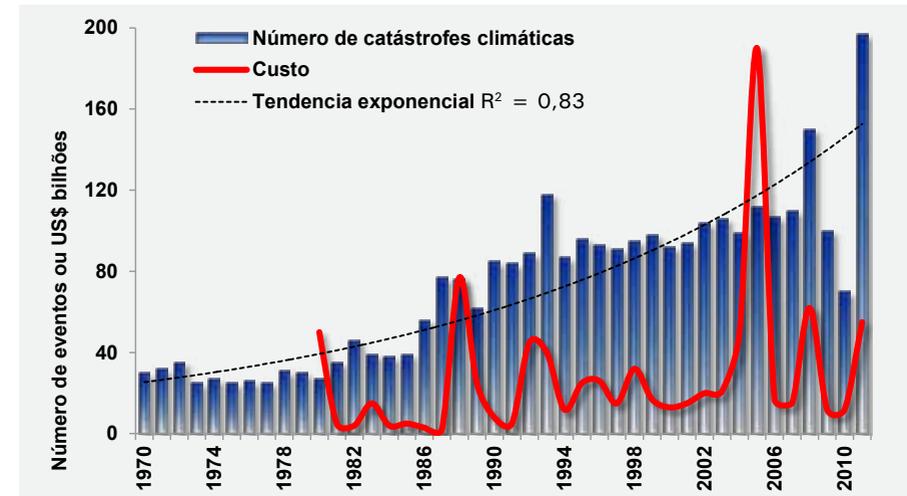


Figura 2. Número de catástrofes climáticas devido à extremos climáticos e seu custo. Fonte: Adaptado de <http://www.roperld.com/science/ExtremeWeather.htm>

Em 1990 o IPCC divulga o primeiro relatório (IPCC, 1990) e, em função da gravidade do assunto, iniciaram-se as negociações no âmbito da ONU. Em 1991, ocorreu a primeira reunião do Comitê de Negociação Internacional (INC) e, em 1992, diversos países aderiram ao tratado internacional denominado The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), mais conhecido como Convenção do Clima. O objetivo central da Convenção é a junção de esforços para, de forma cooperativa, encontrar fórmulas sustentáveis e compatíveis para limitar a subida da temperatura terrestre e outras mudanças climáticas, bem como mitigar o efeito dos impactos considerados como inevitáveis.

A Convenção divide os países em dois grupos: aqueles que estão listados no Anexo 1 da Convenção e aqueles que não são listados (conhecidos como não-Partes do Anexo 1). As partes do Anexo 1 são os países industrializados, que historicamente contribuíram mais fortemente para as mudanças climáticas. Por exemplo, os países da América do Norte e da União Européia são, atualmente, responsáveis por 85% do dióxido de carbono emitidos por atividades essencialmente humanas. A UNFCCC estabeleceu papéis principais para os países industrializa-

dos em termos de redução do aquecimento global e exigiu-lhes ajudar os países em desenvolvimento para evitar os efeitos negativos das alterações climáticas e para permitir a adaptação a elas. O compromisso firmado pelos países constantes do Anexo 1 da UNFCCC foi o de estabilizar suas emissões de gases de efeito estufa, abaixo dos níveis de 1990, até o ano 2000.

Em junho de 1992 foi realizada, no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), mais conhecida como Earth Summit, ou ainda Rio-92, congregando representantes de 178 países (CLEVELAND; KUBISZEWSKI, 2007). A Convenção do Clima, discutida durante o evento, foi formalizada e assinada por 180 países. Em 1995, conforme aumentava a percepção de que a redução de emissões seguindo estritamente as disposições da Convenção era inadequada, foi iniciado um processo de negociação para reforçar a resposta global à mudança climática. Como resultado, foi elaborado o Protocolo de Quioto, acordado em 1997, o qual vincula juridicamente os países desenvolvidos com as respectivas metas de redução de emissões. O período de protocolo de compromisso começou em 2008 e termina em 2012.

A Conferência das Partes (COP) é o órgão supremo da Convenção do Clima, responsável pela sua implementação e que inclui os países que ratificaram ou aderiram à Convenção. Já a Reunião das Partes (MOP) é a instância maior do Protocolo de Quioto. Apesar de acontecer simultaneamente à Conferência das Partes, somente os países signatários do Protocolo têm direito a participar da MOP, bem como deliberar e tomar decisões relativas ao mesmo. Montreal sediou a MOP-1, em 2005. A MOP-2 aconteceu em Nairobi (2006) e a MOP-3 em Bali (2007).

Considerado complementar a diversas políticas e medidas nacionais, o Protocolo de Quioto da UNFCCC é até agora o mais abrangente acordo vinculativo internacional para mitigar a mudança climática. Tendo entrado em vigor em fevereiro de 2005, o Protocolo compromete 37 países industrializados com a redução das suas emissões domésticas em 5%

em relação a 1990, entre 2008 e 2012<sup>2</sup>. O protocolo também cria mecanismos flexíveis, pelos quais os países industrializados podem transferir licenças de emissão entre si e ganhar créditos de emissão por participarem de projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento.

O Protocolo foi firmado por 192 países, enquanto países importantes para o processo, como os Estados Unidos, e outros de menor importância, como Afeganistão, Andorra e Sudão do Sul. Em Dezembro de 2011, o Canadá denunciou o Protocolo.

## 1.2. Ações futuras

A preocupação com a fragilidade no cumprimento das metas, e a necessidade de alinhar as ações posteriores à vigência da primeira etapa do Protocolo de Quioto, levou à abertura de negociações sobre a política pós-2012, durante a primeira Reunião das Partes Protocolo de Quioto (COP11/MOP1), realizada em 2005. O Roteiro de Bali, aprovado na COP13/MOP3 em Bali, em 2007 estabeleceu um processo que abrange tanto a Convenção do Clima quanto o Protocolo de Quioto, visando as ações pós-2012, denominado Bali Roadmap (UNFCCC, 2012b).

Em Cancún (COP16/MOP6) os elementos-chave do Acordo de Copenhague (COP15/MOP15) foram formalmente adotados pela ONU, incluindo o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Um dos desafios do pós-2012 é a necessidade de envolver os países em desenvolvimento com abordagens, que atendam a sua capacidade e sua legítima aspiração para o desenvolvimento econômico e social. Embora com o recurso ao Mercado de Carbono, a pressão para redução voluntária ou por compromissos internacionais será cada vez mais forte e dificilmente deixará de incluir os países emergentes.

Em conclusão, os impactos adversos causados pelas emissões de gases de efeito estufa, e as consequentes mudanças climáticas globais,

<sup>2</sup> As emissões abrangem e gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrogênio e hexafluoreto de enxofre) e dois grupos de outros gases prejudiciais a atmosfera (hidrofluorcarbonetos e perfluorcarbonetos).

estão cada vez mais presentes, provocando um aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, como secas, inundações, furacões, nevascas e outros. Os fundamentos científicos e as evidências atualmente disponíveis mostram que os impactos continuarão intensos, no futuro próximo. Como tal, é perfeitamente previsível que as negociações internacionais, que avançam a passos tímidos, ganhem contornos mais nítidos e rumos mais concretos, exigindo maior participação de cada país para a solução de um problema global (IEA, 2010b; IEA, 2010c).

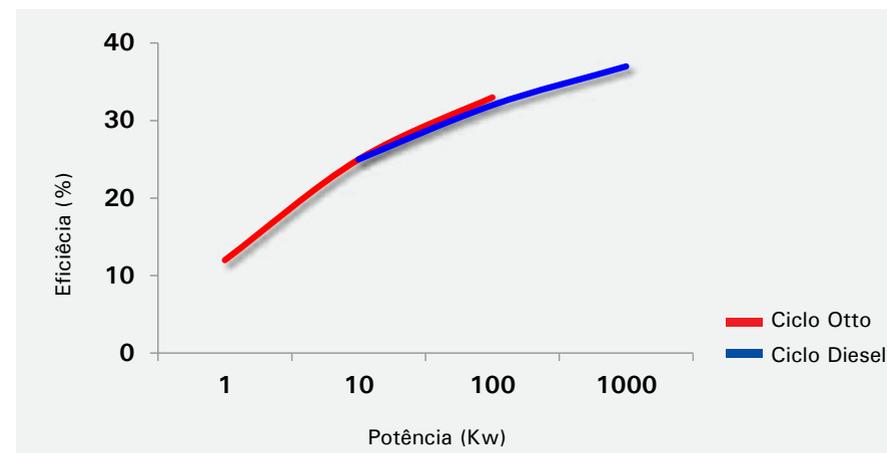
## 2. Emissões globais dos combustíveis

A literatura registra inúmeros estudos relacionando o uso de combustíveis e emissões de GEE, particularmente utilizando a metodologia da análise do ciclo de vida. (DELUCCHI, 2006; DAVIS et al., 2012). Em particular, busca-se demonstrar, com solidez científica que os biocombustíveis redundariam em menores emissões, comparativamente a combustíveis fósseis, ao longo de seu ciclo de vida (conceito *well to wheel*), como os estudos de Tilman et al. (2006), von Blottnitz e Curran (2007), Lettens et al. (2003), Rebitzer (2004) e Farrell et al. (2006). Estes últimos autores destacaram que os estudos que relataram balanços negativos de energia, incorretamente ignoraram os co-produtos do processo. A matéria prima base para obtenção de biocombustíveis é crucial, posto que a maioria dos autores refere que embora o etanol de milho seja menos petróleo-intensivo do que a gasolina, apresenta emissões de GEE semelhantes às da gasolina.

Nikolaus Otto, em 1867, descreveu os princípios de um motor a combustão interna e, em 1876, apresentou um protótipo de motor a quatro tempos. Em 1885, Karl Benz e Gottlieb Daimler colocaram em funcionamento o primeiro motor tracionando um dispositivo móvel. Em 1893, Rudolf Diesel publicou o tratado<sup>3</sup> que daria origem ao motor de ciclo Diesel, desenvolvido entre 1893 e 1897, mais eficiente na relação ener-

<sup>3</sup> *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekannten Verbrennungsmotoren*

gia consumida / potência produzida, que o ciclo Otto. Em linhas gerais, os veículos atuais utilizam o mesmo conceito do final do século XIX. A eficiência do processo de conversão de energia do combustível para o movimento do veículo é limitada pelo ciclo termodinâmico de Carnot, atingindo cerca de 25-33% para o ciclo Otto e 35-40% para o ciclo Diesel, de acordo com Kolchin e Demidov (1984) e Pulkrabek (2004) (Figura 3).



**Figura 3.** Eficiência de motores de combustão interna.

Fonte: Adaptado de College of the Desert, 2001.

O automóvel tornou-se um símbolo de status e comodidade, e pode ser considerado causa e consequência das deficiências dos sistemas de transportes urbanos, formando um círculo vicioso resiliente. Estima-se haver atualmente, no mundo, cerca de 800 milhões de veículos, sendo projetada a frota global em dois bilhões de veículos, para 2050 (LORENZI, 2009).

Uma das consequências do uso de automóveis em larga escala, para transporte individual, são os congestionamentos de trânsito, que aumentam o consumo de combustível, consequentemente as emissões de gases de efeito estufa. A excessiva dependência do automóvel, assim como do modal de transporte rodoviário, baseado em energia fóssil, necessita de

processos urgentes e eficientes de mitigação das emissões, enquanto não se alcança uma solução definitiva, de alta eficiência e baixas emissões.

Rifkin (2002) efetua uma análise interessante que, embora defasada no tempo, mostra-se atual em seus aspectos qualitativos, embora necessitando de atualização dos valores. Cita o autor que, no final da década de 1980, a produção de automóveis ou combustíveis era o objetivo principal das cinco maiores indústrias americanas. Nos EUA, os automóveis consumiam, em 1980, oito milhões de barris de petróleo por dia (quase 1.700 litros anuais por pessoa). Como a maior parte do petróleo consumido nos EUA é importado, este fato tornou o país totalmente dependente do petróleo estrangeiro ao custo de US\$60 bilhões ao ano<sup>4</sup>, importado de países instáveis e geralmente hostis, que adquiriam grande parte de seus armamentos com a venda de petróleo aos EUA. Este país, por sua vez, criou a cultura de constantes intervenções militares para garantir as linhas de abastecimento de petróleo, mostrando as agruras da dependência energética.

No início da década de 1990, a distância total percorrida pelos veículos da frota dos EUA era de aproximadamente 3,38 trilhões de km/ano (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003). Em 2008 este número estava em torno de 10 trilhões de km/ano, segundo Lorenzi (2009) o que, juntamente com a expansão da frota, explica o aumento de quase 1.200% no consumo per capita de petróleo nos EUA, entre 1980 e 2011.

O licenciamento global de veículos cresce duas vezes mais rápido do que a população. Cerca de 15% da população do mundo possuem 76% dos veículos indicando que ainda existe um enorme contingente de consumidores ávidos por adquirir o seu próprio automóvel. As

<sup>4</sup> Em 2011, o consumo de petróleo dos EUA atingiu 19 milhões de barris/dia (6,9 bilhões/ano), com um consumo per cápita de 22.000 L/ano, de acordo com a Energy Information Administration (<http://www.oil.com/articles/2011/08/eia-forecasts-decline-for-us-oil-demand-this-year.html>). O consumo da época, em valores atuais, seria equivalente a US\$270 bilhões, porém sobre um PIB à época de US\$2,8 trilhões, sendo o PIB de 2011 próximo a US\$ 14,5 trilhões ([http://www.usgovernmentspending.com/spending\\_chart\\_1980\\_2010USb\\_13s1i011mcn\\_US\\_Gross\\_Domestic\\_Product\\_GDP\\_History](http://www.usgovernmentspending.com/spending_chart_1980_2010USb_13s1i011mcn_US_Gross_Domestic_Product_GDP_History)).

projeções sugerem que as viagens globais (pessoa por quilômetro por ano) mais que duplicarão entre 1990 e 2020, e dobrarão novamente até 2050 (HAWKEN et al., 1999). O incremento da frota global é de aproximadamente 10 milhões de automóveis e 5 milhões de caminhões e ônibus, anualmente.

As emissões globais do setor de energia são apresentadas na Figura 4, contrastadas com as brasileiras. Verifica-se que, nos últimos 40 anos, as emissões no mundo se incrementaram à média geométrica de 1,8% ao ano, enquanto no Brasil a taxa de crescimento foi superior (3,5% a.a.).

Entre 2008 e 2009 as emissões globais de CO<sub>2</sub> diminuíram 0,5 Gt de CO<sub>2</sub>, um declínio de 1,5%. Enquanto as emissões de países em desenvolvimento (não-Anexo I) cresceram em 2009 (+3,3%), liderados pela Ásia e pelo Oriente Médio, as emissões coletivas dos países desenvolvidos (países Anexo I) caíram fortemente (-6,5%), colocando-as em 6,4% abaixo do seu nível de 1990 (IEA, 2011a). Em 2009, as emissões dos países signatários do protocolo de Quioto situaram-se 14,7% abaixo do seu nível de 1990. A Figura 5 mostra a estabilização das emissões do setor de energia na União Européia e na Rússia (IEA, 2006b), e a disparada das emissões da China (IEA, 2009a; IEA, 2011a).

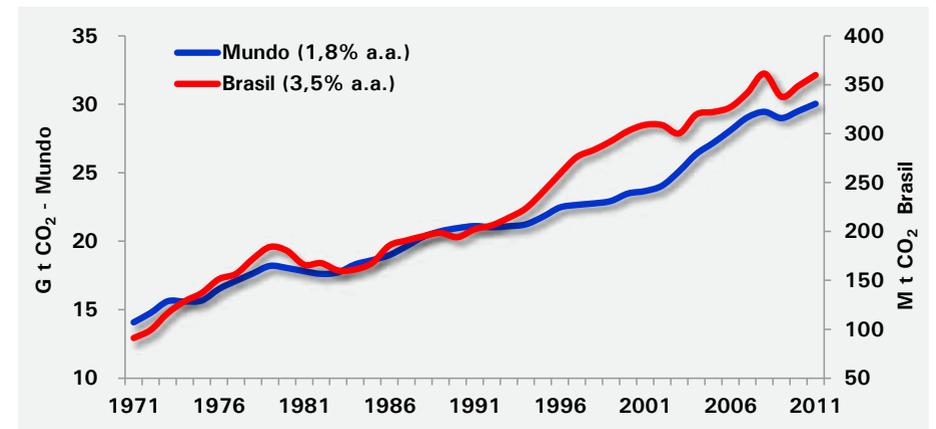
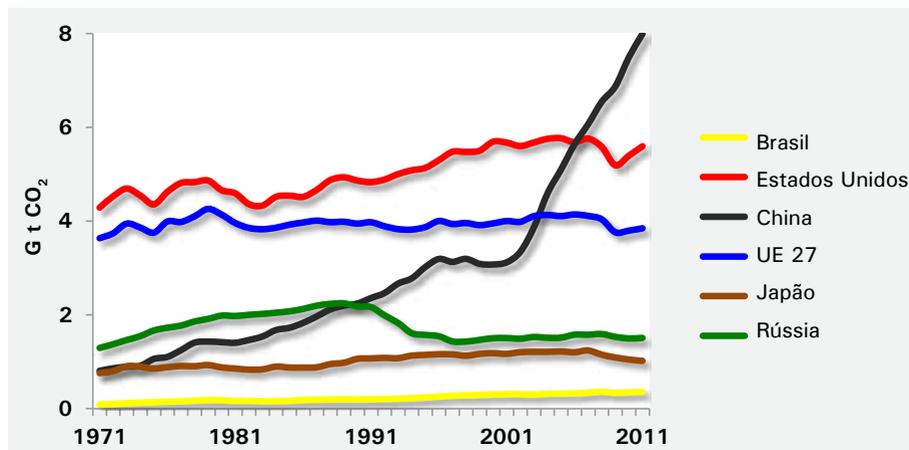


Figura 4. Emissões do setor de energia.

Fonte: IEA, 2011a



**Figura 5.** Evolução das emissões do setor de energia de países selecionados.

Fonte: IEA, 2011a.

Em consequência, a participação relativa do Brasil aumentou no período, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. A redução entre 1980 e 1990 é devido ao baixo crescimento econômico nesta década, e à introdução dos veículos à etanol na frota brasileira. A menor taxa de incremento verificada entre 2000 e 2010 se deve ao menor crescimento do Brasil em relação à média mundial e, especialmente, em relação aos principais países emissores; ao ingresso dos veículos *flex fuel* no mercado; e à implantação do programa de produção e uso de biodiesel.

A principal razão para a mudança no padrão de emissões dos países do Anexo I foi a crise econômica internacional, que atingiu mais duramente as economias desenvolvidas, reduzindo sua atividade econômica, consequentemente as suas emissões, embora o amadurecimento de ações tomadas com a finalidade específica de redução de emissões também haja contribuído para o resultado. Devido a esta tendência, que iniciou em 1990 (SCHIPPER et al, 2000), a parcela de emissões dos países em desenvolvimento aumentou para 54% do total, após superar as emissões dos países desenvolvidos em 2008.

**Tabela 1.** Percentual de emissões do setor de combustível do Brasil em relação ao mundo.

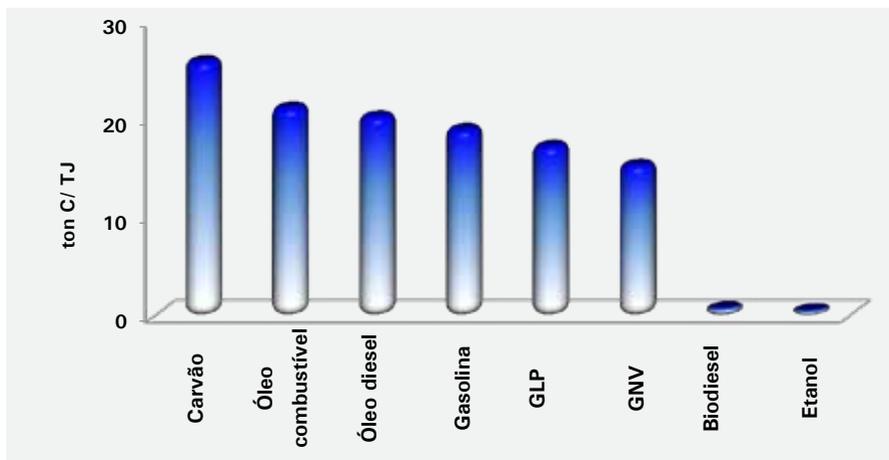
1971	1980	1990	2000	2010
0,65	1,00	0,93	1,29	1,18

Elaboração: D. L. Gazzoni com dados do IEA, 2011a.

As emissões possuem estreita relação com o conteúdo energético e a eficiência energética de um combustível e com a sua origem. Por exemplo, ao longo do ciclo de vida, os biocombustíveis possuem taxas de emissões muito inferiores aos combustíveis fósseis, como pode ser verificado na Figura 6. O aumento das emissões dos países em desenvolvimento deveu-se, principalmente, a um aumento na demanda de carvão – o mais poluente dos combustíveis – enquanto a demanda de petróleo e gás aumentou menos. Entre os países desenvolvidos, a redução nas emissões proveio em 53% da diminuição do uso de carvão, 30% do óleo e 18% do gás natural (Tabela 2).

Em seu cenário de novas políticas, o World Energy Outlook (WEO) (IEA, 2009b) projeta que as emissões mundiais de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis continuarão a crescer ininterruptamente, embora a taxas decrescentes, atingindo 35,4 Gt de CO<sub>2</sub> até 2035 (IEA, 2010a). Esta é uma melhoria em relação aos cenários estabelecidos no WEO de 2009, e está em linha com o cenário mais pessimista apresentado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007a), em sua quarta avaliação, que projeta uma média mundial de aumento da temperatura entre 2,4° C e 6,4° C até 2100.

Os cenários do IPCC projetam um aumento da linha base de emissões variável entre 9,7 e 36,7 Gt de CO<sub>2</sub> equivalente (aumento de 25 a 90%) entre 2000 e 2030 (IPCC, 2007 b). Nestes cenários, os combustíveis fósseis mantêm sua posição dominante na matriz energética além de 2030, logo as projeções de emissões pelo uso de energia entre 2000 e 2030 cresceriam entre 40 e 110%, dependendo do cenário (IPCC, 2007c).



**Figura 6.** Relação entre emissões e conteúdo energético de combustíveis.  
Fonte: Washington University (2005)

**Tabela 2.** Emissões (Mt CO<sub>2</sub>) de combustíveis de países desenvolvidos (Anexo I) e não desenvolvidos (Não anexo I) em 2009, em relação a 2008.

Combustível	Anexo I	Não Anexo I	Total
Carvão	-523	385	-138
Petróleo	-385	77	-308
Gás	-169	23	-146
Outros	-3	3	0
<b>Total</b>	<b>-1.080</b>	<b>488</b>	<b>-592</b>

Adaptado de EIA, 2011.

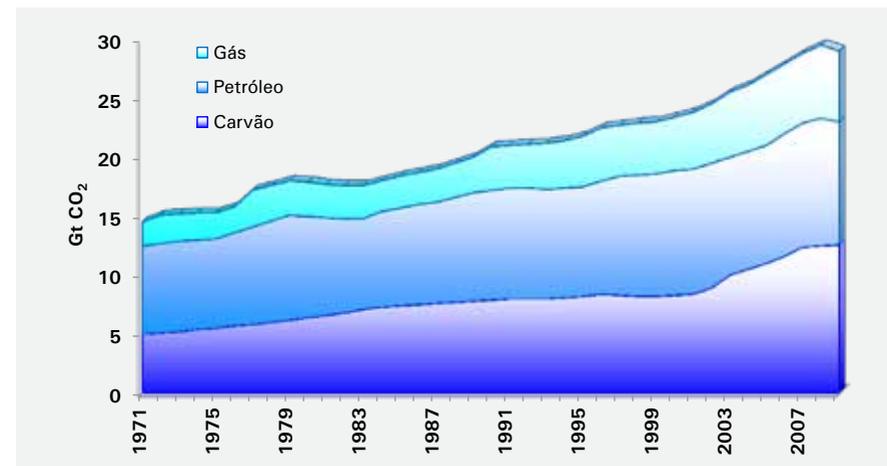
De acordo com a Agência Internacional de Energia, em 2009, 43% das emissões de CO<sub>2</sub>, provenientes da queima de combustível, foram produzidas a partir de carvão, 37% do petróleo e de 20% a partir de gás.

Analisando individualmente as emissões dos três principais combustíveis, entre 2008 e 2009, observa-se que as emissões de CO<sub>2</sub> por combustão de carvão diminuíram cerca de 1%, atingindo 12,5 Gt de CO<sub>2</sub>. Correntemente, o carvão se consitiu na principal fonte de ener-

gia nova dos países em desenvolvimento, especialmente China (IEA, 2006a; IEA, 2009) e Índia, onde a produção industrial intensiva em energia está crescendo rapidamente, coincidindo com grandes reservas de carvão e limitação de outras fontes, nestes países. As emissões globais, por combustível, estão expostas na Figura 7.

As emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do petróleo caíram 2,2% em 2008. Este resultado é adveniente da diminuição da percentagem do petróleo no total da oferta de energia primária (TPES), em consequência do crescimento da penetração do gás, reduzindo as emissões provenientes do petróleo, que liberaram 10,6 Gt de CO<sub>2</sub> em 2009. Apesar do resultado favorável em 2008-2009, o WEO de 2011 (IEA, 2011b) projeta que as emissões de petróleo vão crescer até atingir 12,6 Gt, em 2035.

Ainda de acordo com a IEA (2011b), as emissões de gás natural representaram, em 2009, 5,8 Gt de CO<sub>2</sub>, que foram 2,2% superiores às do ano anterior. Na projeção para o futuro mediato, as emissões continuarão a crescer, subindo para 8,4 Gt CO<sub>2</sub> em 2035.



**Figura 7.** Emissões globais por combustíveis fósseis.  
Fonte: IEA, 2011a.

### 3. Emissões de gases de efeito estufa no Brasil

#### 3.1. Emissões totais

As emissões brasileiras do setor de energia são pouco representativas no contexto global, devido à matriz energética relativamente limpa do país, de fundamento hidrelétrico, e o uso de biocombustíveis na área de transporte, tendo a matriz 46% de participação de energia renovável (Figura 8). Entretanto, o setor de transportes é responsável por, aproximadamente, 50% do consumo de petróleo, na forma de diesel e gasolina, sendo, portanto um grande emissor. O querosene de aviação e o óleo combustível são usados em menor quantidade no país.

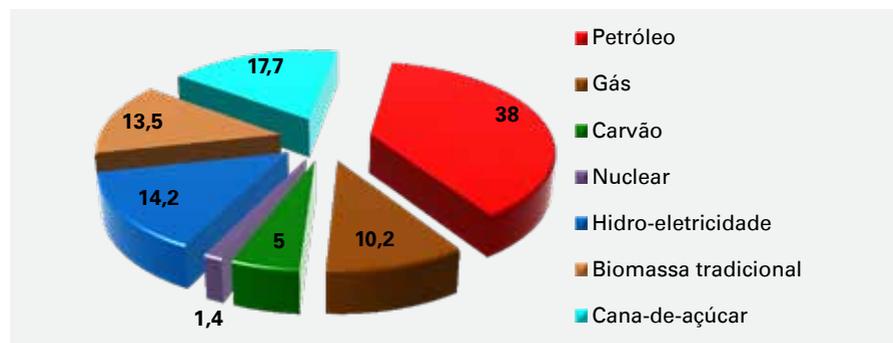


Figura 8. Matriz energética brasileira por porcentagem de fonte

Fonte: EPE, 2011.

De acordo com o Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2009), as principais fontes emissoras, no segmento de transportes são:

#### a. Combustíveis

Nesse setor incluem-se as emissões de CO<sub>2</sub> por oxidação do carbono contido nos combustíveis fósseis durante a sua queima, seja para geração de outras formas de energia, como eletricidade, seja no consumo final (indústria ou transporte). São contabilizadas também as emissões de outros gases de efeito estufa durante o processo de combustão (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub> e outros compostos orgânicos voláteis não metâni-

cos - NMVOC). No caso dos combustíveis de biomassa (lenha, carvão vegetal, álcool, bagaço), as emissões de CO<sub>2</sub> não são contabilizadas como emissões de combustível, pois os combustíveis de origem renovável não geram emissões líquidas e as emissões associadas à parcela não renovável são incluídas no setor de Mudança do Uso da Terra e Florestas.

#### b. Emissões fugitivas

Inclui as emissões de gases de efeito estufa durante o processo de mineração, estocagem, processamento e transporte de carvão mineral ou extração, transporte e processamento de petróleo e gás natural. As emissões associadas ao carvão mineral incluem a emissão de CH<sub>4</sub> durante o processo de mineração e beneficiamento e as emissões de CO<sub>2</sub> por combustão espontânea em pilhas de rejeito. As emissões associadas ao petróleo e ao gás natural incluem as fugas de CH<sub>4</sub> durante a extração de petróleo e gás natural (*venting*), durante o transporte e distribuição em dutos e navios e durante seu processamento nas refinarias. São também consideradas as emissões de CO<sub>2</sub> por combustão não útil (*flaring*) nas plataformas de extração de petróleo e gás natural e nas unidades de refinaria.

No segmento de agropecuária onde, além de alimentos, é produzida a matéria prima para biocombustíveis, os principais processos que resultam em emissões de gases de efeito estufa são:

#### a. Fermentação entérica

A fermentação entérica dos animais ruminantes herbívoros, que faz parte da sua digestão, é uma das maiores fontes de emissão de CH<sub>4</sub> no país, destacando-se as emissões devidas ao rebanho bovino, que é o segundo maior no mundo. O sebo bovino é a segunda fonte mais importante de matéria prima para produção de biodiesel.

#### b. Manejo de dejetos de animais

Os sistemas de manejo de dejetos de animais podem causar emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. A decomposição anaeróbia produz CH<sub>4</sub>, principalmente

quando os dejetos são estocados em forma líquida. Além da gordura utilizada para produção de biodiesel, é possível produzir biogás a partir de dejetos animais.

### c. Cultivo de arroz

O arroz, quando cultivado em campos inundados ou em áreas de várzea, é uma importante fonte emissora de CH<sub>4</sub>. Isso ocorre em razão da decomposição anaeróbica de matéria orgânica presente na água. No Brasil, porém, a maior parte do arroz é produzida em áreas não inundadas, reduzindo a importância do setor nas emissões totais de CH<sub>4</sub>. A palhada de arroz pode ser usada para gerar bioeletricidade.

### d. Queima de resíduos agrícolas

A queima de resíduos agrícolas, imperfeita por ser feita naturalmente no campo, produz emissões de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, CO e NMVOC. No Brasil, a prática de queima de resíduos agrícolas ocorre principalmente na cultura de cana-de-açúcar. Entretanto, estas emissões serão praticamente zeradas na próxima década, pelo avanço da colheita mecânica de cana. Os resíduos agrícolas, como a palhada e o bagaço de cana e cascas de cereais podem ser usados para produção de biocombustíveis de segunda geração ou bioeletricidade.

### e. Emissões de N<sub>2</sub>O provenientes de solos agrícolas

A emissão de N<sub>2</sub>O em solos agrícolas decorre da aplicação de fertilizantes nitrogenados, tanto de origem sintética quanto animal, e da deposição de dejetos de animais em pastagem. Esse último processo não é considerado aplicação de fertilizante, já que não é intencional, porém, é o mais importante no Brasil devido à predominância da pecuária extensiva. Os resíduos vegetais deixados no campo e o processo de fixação biológica de nitrogênio, que ocorre na cultura da soja, também são fontes de emissão de N<sub>2</sub>O. Ainda dentro deste setor enquadra-se o cultivo de solos orgânicos, que aumenta a mineralização da matéria orgânica e libera N<sub>2</sub>O.

## 3.2. Emissões do setor de transportes no Brasil

Segundo Bigio (2001), as emissões veiculares somam mais de 70%

da poluição do ar urbano em grandes cidades, provocando um aumento do índice de mortalidade prematura, mortalidade por doenças respiratórias, perda de produtividade dos cidadãos e trabalhadores, aumento dos custos do seguro-saúde e perda significativa da qualidade de vida urbana. Segundo Saldiva (2011), uma pessoa que viva toda a sua vida na cidade de São Paulo possui uma expectativa de vida 3,5 anos inferior a outra pessoa, que viva toda a sua vida em Curitiba, em função das emissões ocasionadas por combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes.

Todos estes aspectos negativos provocam perdas monetárias significativas na casa dos bilhões de dólares anuais. A magnitude da poluição do ar pode desencorajar investimentos econômicos em cidades extremamente poluídas, causando perdas econômicas adicionais no longo prazo para a sociedade como um todo.

Presentemente, o maior volume de emissões brasileiras (76%) é englobado no grupo que reúne desmatamento e emissões da agropecuária, incluindo mudanças no uso da terra, de acordo com o Inventário Brasileiro das Emissões de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2009). O transporte de carga no Brasil é fortemente concentrado no modal rodoviário. Entretanto, esta não é uma característica exclusiva do país, conforme se verifica na Figura 9, posto seu protagonismo na Europa e Japão, a liderança na China, e a importância do mesmo para os EUA.

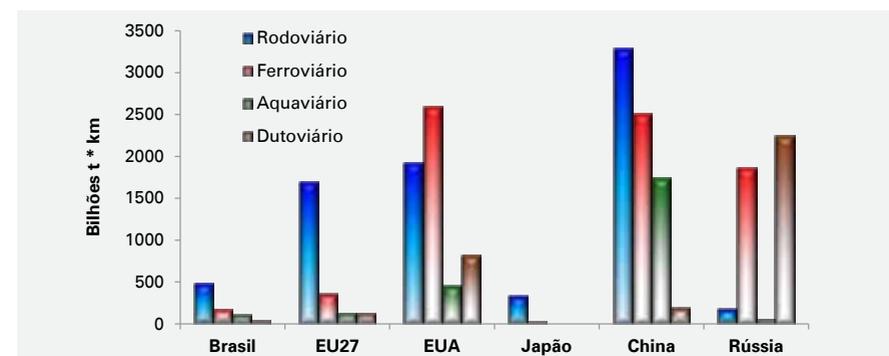
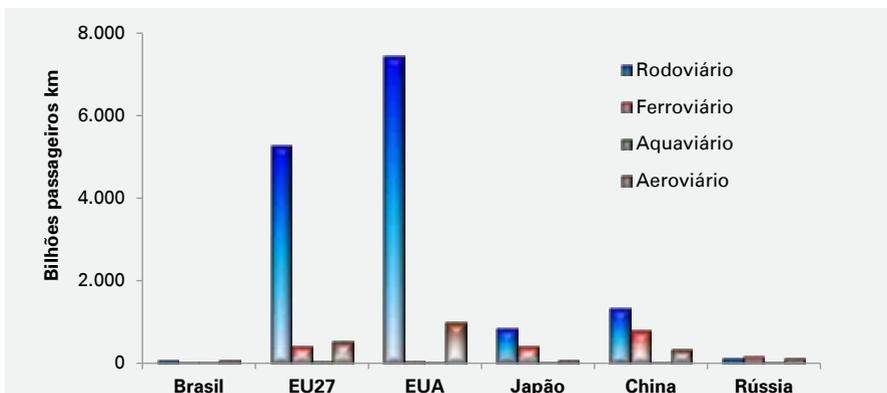


Figura 9. Comparativo dos modais de transporte de carga, ano base 2010. Fontes: EU, 2011; CNT, 2011; ITF, 2010.

No entanto, em termos de eficiência energética, os modais dutoviárias, aquaviárias e ferroviárias (nesta ordem), e mesmo os sistemas multimodais são mais eficientes que o uso exclusivo de rodovias. Como resultante, as emissões decorrentes do transporte, equalizados pelo critério de bilhões de toneladas transportadas por quilômetro, seguem a mesma ordem da eficiência mencionada acima.

A Figura 10 ilustra, graficamente, a desproporção entre os passageiros transportados anualmente nos EUA e na União Européia, em relação a outros países como o Japão, Rússia e China, e particularmente o Brasil. O índice europeu é 44 vezes e o americano 59 vezes superior ao brasileiro. Por outro lado, o transporte intermunicipal e interestadual<sup>5</sup> de passageiros no Brasil apresenta uma tendência clara de migração dos modais rodoviários e ferroviários para o aeroviário, em trechos superiores a 300 km, ao contrário do que ocorre em outros países (SNEA, 2011).



**Figura 10.** Comparativo dos modais de transporte de passageiros, ano base 2010. Fontes: EU, 2011; CNT, 2011.

A explicação para este fenômeno apontaria para três aspectos. O primeiro deles aparentemente seria a grande distância a ser percorrida pelo passageiro em um país com dimensões continentais, como o Brasil. Entretanto,

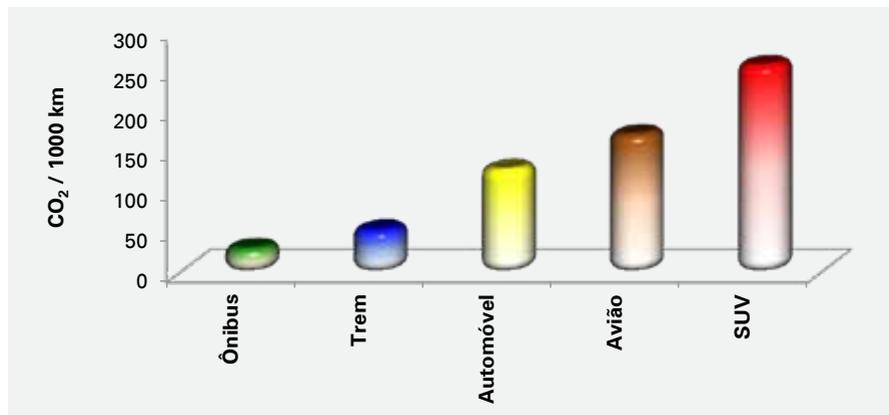
<sup>5</sup> Os passageiros internacionais não foram computados porque a técnica de alocação dos gases de efeito estufa para cada país é muito complexa e não altera o raciocínio expresso.

países ou blocos com extensão geográfica semelhante (China, EUA, Rússia ou Europa) não apresentam a mesma tendência e a participação relativa do modal aeroviário é inferior à brasileira (Tabela 3). Na Europa 8% do transporte de passageiros ocorre por via aérea; na China, 13%; nos EUA 11%; e na Rússia 29%, o mais próximo de 54% calculado para o Brasil, o que relativiza este fator.

O segundo aspecto remete à má qualidade das rodovias, que eleva o custo do transporte, transferido ao passageiro. Existem poucas rodovias que possam se assemelhar às autovias expressas, como existentes nos EUA, Europa ou Japão e, quando existem, os custos de pedágio são exorbitantes, favorecendo o transporte aéreo, que além de mais rápido e confortável, se torna mais acessível. A inexistência da oferta de transporte ferroviário de passageiros no Brasil, em trechos superiores a 300 km, também favorece a opção pelo transporte aéreo.

Em contraste, o preço médio da passagem aérea tem apresentado uma tendência de queda no Brasil, comparativamente ao transporte por ônibus. Tem ocorrido com frequência cada vez maior, a oferta de passagens aéreas a preços mais baixos que as passagens de ônibus, além dos aspectos de economia de tempo, conforto e segurança, além do fascínio que o transporte aéreo exerce sobre as camadas emergentes de classes econômicas mais baixas, que tem acendido a um patamar superior de renda.

Entretanto, do ponto de vista exclusivamente das emissões, a opção pelo transporte aéreo não é a mais eficiente, como se depreende da Figura 11. As emissões de um passageiro aéreo são 5,7 vezes maiores que um passageiro de ônibus, 3,2 vezes mais altas que um passageiro e trem e 1,3 vezes maior que um passageiro de automóvel, viajando sozinho, no mesmo trecho. A explicação para o fato é a velocidade do meio de transporte e as conseqüentes perdas aerodinâmicas, que são proporcionais ao quadrado da velocidade de movimento.



**Figura 11.** Comparativo de emissões entre modais de transporte.

Fonte: [www.transportdirect.info/Web2/JourneyPlanning/JourneyEmissionsCompare.aspx](http://www.transportdirect.info/Web2/JourneyPlanning/JourneyEmissionsCompare.aspx)

A Tabela 3 também permite observar que o número de quilômetros médios viajados por um passageiro no Brasil, durante um ano, é muito baixo em relação ao mundo. Na China, em média, cada passageiro percorre uma distância 3 vezes maior, enquanto nos EUA este valor é 37 vezes maior. Este fato permite explicar a baixa participação relativa do Brasil nas emissões globais no setor de combustíveis (Tabela 4).

**Tabela 3.** Bilhões de passageiros x quilômetros transportados em diferentes modais.

	Brasil	EU27	EUA	Japão	China	Rússia
Rodoviário	65,0	5.290,0	7.444,0	854,0	1.345,0	115,0
Ferroviário	0,6	405,0	37,0	394,0	788,0	152,0
Aquaviário	0,4	40,0	0,6	5,0	7,0	0,9
Aeroviário	77,5	522,0	978,0	75,2	338,0	113,0
Total	143,5	6.257,0	8.459,6	1.328,2	2.478,0	380,9
Comparativos auxiliares						
População	193	739	310	127	1.338	142
Km capita	743	8.467	27.289	10.458	1.852	2.682
Brasil/Mundo		11	37	14	3	4
Aéreo/Total	54	8	12	6	14	30

Elaboração: D. L. Gazzoni com dados de EU, 2011; CNT, 2011.

**Tabela 4.** Participação relativa de países e blocos nas emissões do setor de energia.

	1971	1980	1990	2000	2010
Brasil	0,65	1,00	0,93	1,29	1,18
EUA	30,47	25,82	23,22	27,18	18,29
China	5,75	7,87	10,70	13,10	25,41
UE 27	25,83	22,93	18,84	16,84	12,87
Japão	5,39	4,88	5,08	5,04	3,56
Rússia	9,21	11,00	10,39	6,41	5,08

Elaboração: D. L. Gazzoni com dados de EU, 2011

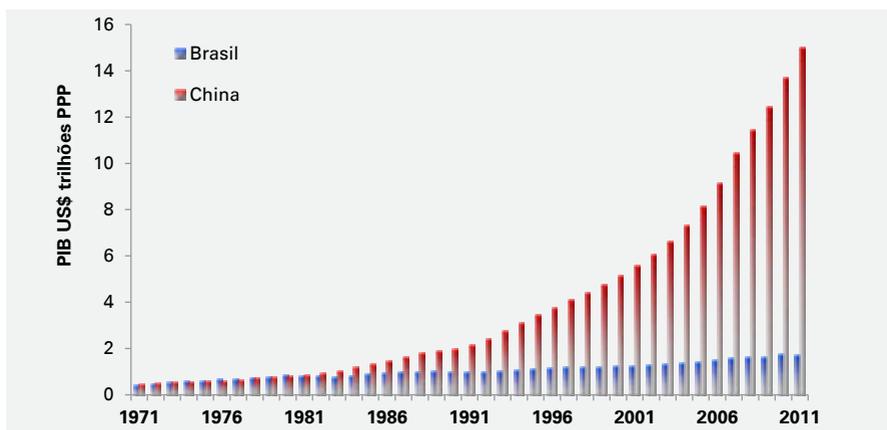
Nos últimos 40 anos, dentre os países e bloco referidos, apenas o Brasil e a China aumentaram a sua participação relativa nas emissões do setor de combustíveis. Entretanto, enquanto o Brasil aumentou suas emissões de 91 para 360 Mt CO<sub>2</sub> anuais (300%), a China incrementou de 809 para cerca de 8.000 Mt CO<sub>2</sub> (888%).

Dois fatores explicam o comportamento diferencial entre os dois países. O primeiro deles refere-se à disparidade das taxas de crescimento do PIB dos dois países (Figura 12), que se torna visivelmente discrepante a partir do início da última década. Nos últimos 40 anos, enquanto o Brasil manteve taxa geométrica anual de 3,83%, a China cresceu 9,04% ao ano, em média.

O segundo fator é a diferença na matriz energética dos dois países. Enquanto 46% da matriz energética brasileira é renovável, apenas 0,5% da matriz da China é composta de fontes renováveis, sendo dominada pelo carvão, com 70,4%, que é a fonte com maior potencial de emissões (Figura 13).

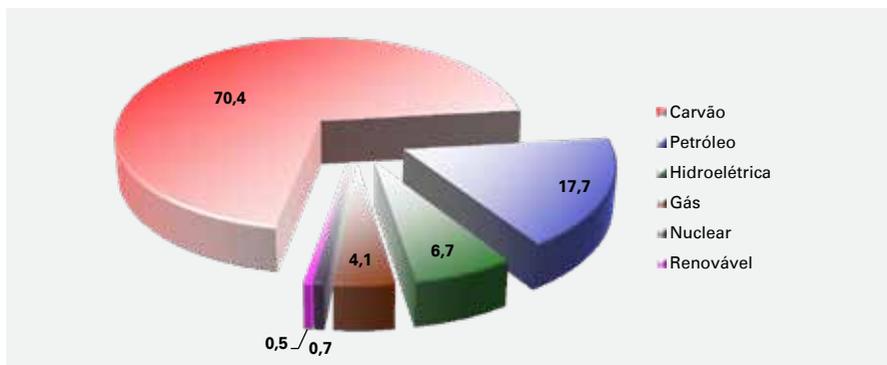
De acordo com o Balanço Energético Nacional, o consumo do setor de transportes, em 2010, foi de 69.451 Mtep (milhões de toneladas equivalente de petróleo), respondendo por 30% do total da energia primária consumida no Brasil (Tabela 5). Em 1970 o setor de transportes respondia por 22% do consumo energético, elevando-se a 25% em 1985 e alcançando 30% em 2000.

Entre 2009 e 2010, o setor de transportes cresceu 10,8%, acima do consumo de energia do país (9,6%), impulsionado pelo crescimento da frota de veículos do Brasil. No mesmo período, o PIB brasileiro cresceu 7,5%, portanto o setor de transportes foi um dos impulsionadores do crescimento do PIB. Entretanto, quando se analisa a eficiência da contribuição para o crescimento entre os dois setores que mais consomem energia (industrial e transportes), verifica-se uma eficiência superior do setor industrial



**Figura 12.** Comparativo entre o valor do PIB (PPP) do Brasil e da China

Fonte: IMF, 2011.



**Figura 13.** Matriz energética da China por porcentual de fonte

Fonte: BP, 2012.

**Tabela 5.** Balanço Energético Nacional por setores (em Mtep)

Setor	2010	2009	2010/2009
Setor Industrial	86.333	76.413	13,0%
Setor Transportes	69.451	62.687	10,8%
Setor Energético	26.136	24.415	7,0%
Setor Residencial	23.673	23.227	1,9%
Setor Agropecuário	9.911	9.453	4,8%
Setor Comercial	6.777	6.314	7,3%
Setor Público	3.814	3.717	2,6%
Total	226.094	206.225	9,6%

Fonte EPE, 2011

De fato, ao examinar a Tabela 6, observa-se que, enquanto no setor industrial para cada unidade de energia foram obtidas 10,49 unidades de PIB, para o setor de transporte este valor foi reduzido para 2,33, significando que o setor industrial é 4,5 vezes mais eficiente que o setor de transportes na geração de riqueza a partir da mesma quantidade de energia consumida. Na análise inversa, observa-se que a intensidade de energia do PIB setorial de transporte é exatamente o inverso, ou seja, cada unidade de PIB gerada pelo setor industrial demanda 0,10 unidades de energia, contrastando com 0,43 unidades utilizadas pelo setor de transportes.

**Tabela 6.** Relação entre PIB e consumo de energia no Brasil.

Setor	Energia (1000 tep)	PIB (R\$ milhões)	PIB/Energia	Energia/PIB
Industrial	86.333	905.852	10,49	0,10
Transportes	69.451	161.936	2,33	0,43

Fontes: EPE, 2011 e IBGE, 2012.

Evidentemente esta relação também afeta as emissões setoriais, quando consideradas por unidade de PIB produzida, como assinala a Tabela 7. Verifica-se, de acordo com a comparação entre emissões e PIB setorial de 2005, que o setor industrial produz 4,73 unidades de PIB para cada unidade de emissão, enquanto o setor de transporte

gera apenas 0,67 unidades de PIB por unidade de emissão, sendo sete vezes mais poluente que o setor industrial, por este critério. Na análise reversa, enquanto o setor industrial emite 0,21 Mt CO<sub>2</sub> por R\$1 bilhão de PIB gerado, o setor de transportes emite 1,49 Mt de CO<sub>2</sub> por R\$1 bilhão de PIB produzidos.

**Tabela 7.** Relação entre emissões e PIB setoriais no Brasil.

Setor	Emissões Mt CO <sub>2</sub>	PIB R\$ Bilhões	PIB/ Emissões	Emissões/ PIB
Industrial	114	539	4,73	0,21
Transportes	136	91	0,67	1,49

Fontes: IBGE, 2012 e MCT, 2009.

A forte desproporção entre PIB e emissões pode ser parcialmente explicada pelo fato de que o setor de transportes utiliza 60% do petróleo consumido no Brasil (EPE, 2011). Apesar da política pública de mistura de etanol anidro na gasolina A (que é a gasolina pura), do uso extensivo de álcool hidratado nos veículos *flex fuel*, existe uma forte participação do óleo diesel no setor de transportes, onde o biodiesel responde por somente 5% (B5). Também pesa negativamente a precariedade da infraestrutura viária do país, que provoca congestionamentos nos centros urbanos e ineficiência no transporte rodoviário de passageiros e de cargas.

A Tabela 8 detalha o consumo de combustíveis no setor de transporte, onde se verifica que, em 2010, 71,3% da demanda energética foi suprida com fontes fósseis, sendo o óleo diesel responsável por 43,6%, posto que 5% do óleo diesel refere-se à adição de biodiesel. Neste ano ocorreu uma relação diversificada em relação ao ano anterior (2009).

O consumo energético total cresceu 10,8%, impulsionado pelo óleo diesel (11,2%). Já o consumo da gasolina A cresceu 19,4%, na esteira de uma redução na proporção de participação do etanol hidratado e na redução da mistura de etanol anidro para formulação da gasolina C, razão pela qual este combustível cresceu 11,7%.

**Tabela 8.** Consumo de combustíveis no setor de transportes (1000 tep)

Combustível	2010	% 2010	2009	2010/2009
Óleo diesel <sup>1</sup>	33.756	48,6	30.369	11,2%
Gasolina <sup>2</sup>	17.515	25,2	14.674	19,4%
Etanol hidratado	8.243	11,9	8.400	-1,9%
Etanol anidro	3.790	5,5	3.392	11,7%
Gás natural	1.766	2,5	1.853	-4,7%
Outros <sup>3</sup>	4.380	6,3	3.998	9,6%
Total	69.451		62.687	10,8%

<sup>1</sup> Inclui biodiesel; <sup>2</sup> Inclui apenas gasolina A (automotiva); <sup>3</sup> Inclui gasolina de aviação, querosene de aviação, gás natural, óleo combustível e eletricidade

Fonte: EPE, 2011.

Em função do apresentado, cumpre efetuar uma análise comparativa entre os principais setores responsáveis por emissões no Brasil, prospectando seu comportamento no longo prazo. De acordo com o Inventário Brasileiro de Emissões (BRASIL, 2009), o uso da terra e de florestas responde por 75% das emissões. O consumo de energia foi responsável por 21,8% das emissões. Analisando a decomposição das emissões ocasionadas por queima de combustíveis fósseis, verifica-se que 40% das emissões deste segmento (8,8% das emissões totais do país) correspondem ao setor de transportes. O setor industrial responde por 32% das emissões de energia, o que equivale a 7% das emissões totais do Brasil.

A análise que se impõe é que o fato de 75% das emissões brasileiras serem derivadas de uso da terra e de florestas não significa um dogma imutável. Ao contrário, verifica-se uma tendência de redução do desmatamento no país, que deverá ser mantida no futuro, a qual provocará inversões na contribuição de cada setor para as emissões globais do país, no longo prazo.

Examinando a Figura 14, observa-se que, entre 1988 e 2011, quando o desmatamento acumulado na Floresta Amazônica atingiu 9,34% no período, é possível identificar fatos que merecem destaque. O primeiro deles mostra que, à exceção do ano de 1995, o desmatamento no pe-

ríodo anterior a 2003 havia se estabilizado em torno de 0,5% ao ano, em relação à floresta remanescente.

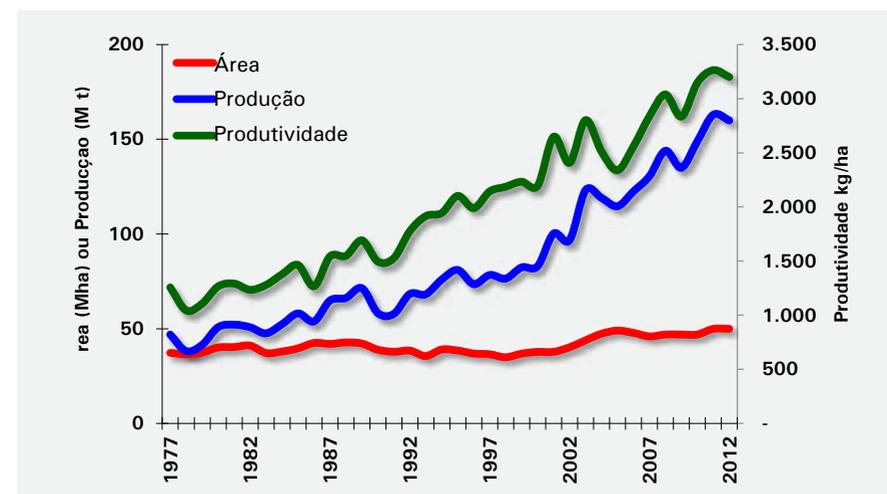
O segundo fato é a ascensão que ocorre entre 2003 e 2004, justamente no período anterior ao estabelecimento do inventário de emissões brasileiras. O mesmo inventário, se realizado em 2011, traria outros resultados. E o terceiro fato – o mais auspicioso – é a queda consistente verificada a partir de 2005, fazendo com que o desmatamento se situasse nos menores valores desde que o INPE/PRODES iniciou o monitoramento (INPE, 2012).

A manter-se a tendência atual, a taxa de desmatamento deverá confluir, até o final desta década, para valores inferiores a 0,1% de desmatamento da área remanescente da floresta, ao ano. Desta forma, a contribuição do desmatamento para as emissões diminuirá sensivelmente no período futuro, alterando a sua contribuição relativa para as emissões totais.



**Figura 14.** Desmatamento no Bioma Amazônia  
Elaboração D. L. Gazzoni usando dados de INPE, 2012.

Por sua vez, a Figura 15 mostra a evolução da área plantada com grãos, sua produção e produtividade (CONAB, 2012). Verifica-se que a área total de grãos cresceu apenas 0,88% ao ano entre 1977 e 2012, tendo se estabilizado no patamar de 47 milhões de hectares, nos últimos 8 anos. Igualmente cresce no país o uso de técnicas como a integração lavoura pecuária, que permite obter duas safras em um mesmo ano e ainda utilizar a área como pastagem no restante do tempo.



**Figura 15.** Área, produção e produtividade de grãos no Brasil.  
Fonte: Conab, 2012.

Como corolário, depreende-se da Figura 15, a forte associação entre produtividade das culturas e produção de grãos, com incremento da produtividade a taxas médias geométricas anuais de 2,64% entre 1977 e 2012, porém muito mais altas (4,93%) entre 1997 e 2012, enquanto a contribuição do aumento de área foi marginal. Mantidas as altas taxas de incremento da produtividade agrícola, o que é perfeitamente possível para o conjunto de grãos e para outros segmentos da agropecuária no Brasil, a contribuição da expansão de área para a produção agrícola será marginal. E, eventuais áreas a expandir, advirão de políticas públicas,

como a recuperação de áreas antropizadas e degradadas, ou pelos ganhos de eficiência dos índices zootécnicos, liberando áreas de pastagens para a agricultura ou para o plantio de florestas comerciais.

Desta forma, também diminui o volume de emissões por mudança do uso da terra, assim como o uso de tecnologias específicas, como o plantio direto, a integração lavoura pecuária ou a fixação biológica de nitrogênio, diminuirão as emissões associadas ao processo agrícola. A melhoria dos índices zootécnicos, em especial dos índices de precocidade e desfrute, igualmente reduzirão a contribuição da pecuária para as emissões.

Em sentido inverso, a tendência do setor de transportes é de aumentar a demanda de energia, em função do crescimento da frota pois, de acordo com a ANFAVEA (2011), desde 2000 o crescimento no número de veículos licenciados no Brasil (9,3% a.a.) é acentuado tanto em relação a automóveis (8,3% a.a.) e comerciais leves (13,1% a.a.), que utilizam preponderantemente gasolina C (com adição de etanol anidro) e etanol hidratado, quanto no tocante a caminhões (11,4%) e ônibus (7,3% a.a.).

Como tal, pelas tendências recentes inversas entre o setor de transportes e o industrial versus o setor de uso da terra e florestas, é lícito esperar uma contribuição crescente nas emissões dos primeiros, ou seja, dos setores intensivos na utilização de combustíveis, para as emissões totais do Brasil. A manutenção do baixo preço da gasolina, os prazos elásticos de financiamento e a ascensão de um ponderável contingente de cidadãos à faixa de consumo de automóveis, associado com o serviço de transporte de massa de baixa qualidade, impulsionarão as vendas de automóveis, conjuntamente com combustíveis.

Esta tendência transparece na Tabela 9, onde se verifica um crescimento anual de 3,55% no consumo energético, de 3,86% nas emissões do setor industrial, de 3,14% na demanda energética e de 3,41% nas emissões do setor de transportes.

**Tabela 9.** Consumo de energia e emissões dos setores industrial e de transportes.

Parâmetro	1990	1994	2000	2005	%
<b>Setor Industrial</b>					
Emissões CO <sub>2</sub> em Tg	65	85	105	115	3,86
Consumo Energético M tep	44	50	61	73	3,55
Índice de CO <sub>2</sub> (Tg/M tep)	1,49	1,63	1,72	1,56	
<b>Setor Transportes</b>					
Emissões CO <sub>2</sub> em Tg	82	95	124	136	3,41
Consumo Energético M tep	33	38	47	52	3,14
Índice de CO <sub>2</sub> (Tg/M tep)	2,49	2,5	2,62	2,60	

Fonte: Adaptado de Andrade e Mattei (2011)

O índice de CO<sub>2</sub> que mede as emissões em função do consumo de energia, do diferentes setores depende da matriz de energia utilizada e dos modais que compõem o setor (Tabela 10). Embora, em ambos os casos, tenha havido um crescimento no índice entre 1990 e 2005, é importante verificar que o índice do setor de transportes é cerca de 66% mais elevado que o setor industrial. Este fato deriva da maior concentração de derivados de petróleo no setor de transportes e do maior uso de hidroeletricidade no setor industrial.

**Tabela 10.** Consumo de energia e emissões em modais de transporte.

Parâmetro	1990	1994	2000	2005	%
<b>Modal Aéreo</b>					
Emissões CO <sub>2</sub> em Tg	5,82	6,21	9,42	7,69	1,87
Consumo Energético M tep	1,97	2,09	3,18	2,6	1,87
Índice de CO <sub>2</sub> (Tg/M tep)	2,96	2,96	2,96	2,96	
<b>Modal Rodoviário</b>					
Emissões CO <sub>2</sub> em Tg	71,34	83,22	110,6	123,17	3,71
Consumo Energético M tep	29,28	34,03	42,77	48,07	3,36
Índice de CO <sub>2</sub> (Tg/M tep)	2,44	2,45	2,59	2,56	
<b>Outros modais</b>					
Emissões CO <sub>2</sub> em Tg	5,07	4,82	4,17	5,29	0,28
Consumo Energético M tep	1,72	1,64	1,44	1,79	0,27
Índice de CO <sub>2</sub> (Tg/M tep)	2,95	2,95	2,9	2,96	

Fonte: Adaptado de Andrade e Mattei (2011)

Decompondo o setor de transportes por seus principais modais, verifica-se a grande contribuição do modal rodoviário, responsável em 2005 por 92% da energia consumida nos transportes (89% em 1990) e 90% das emissões (87% em 1990). Entretanto o índice de CO<sub>2</sub> do modal rodoviário é sempre inferior ao dos demais modais, por conta do uso de gasolina C (com 20-25% de etanol anidro) e de etanol hidratado em veículos *flex fuel*. Em 2005 ainda não havia a obrigatoriedade de mistura de biodiesel no óleo diesel.

Efetuada uma comparação internacional, verifica-se que, em 2007, o setor de transportes no Brasil respondeu por 45% das emissões de combustíveis fósseis do país, acima dos EUA (33%) e muito acima da Rússia (15%), Índia (10%) e China (8%). Em decorrência, para manter suas emissões sob controle, sem prejuízo das atuais políticas públicas que reduzem o desmatamento e que promovem o aumento da produtividade sustentável da agropecuária, será necessário que o país invista em fontes de energia renováveis, de menor potencial de emissão, como o uso de biomassa para geração de eletricidade e para outros fins industriais, o uso de biocombustíveis e o aproveitamento da energia solar e eólica, além de um sólido programa de eficiência energética da economia, que permitisse produzir a mesma riqueza com menor consumo de energia e que incentivasse o uso de aparelhos e equipamentos demandassem menos energia para oferecer a mesma potência.

#### 4. Frota de veículos e consumo de combustíveis no Brasil

A Figura 16 apresenta a evolução da frota de veículos no Brasil, estimada a partir de resultados do Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (ANFAVEA, 2011). O maior crescimento da frota se concentra nos automóveis e comerciais leves, seguidos por caminhões.

A Figura 17 expõe o licenciamento anual de veículos novos no Brasil, observando-se que, ao longo da última década, o número de novos automóveis licenciados anualmente saltou de 1,3 para mais de 2,8 milhões. Os comerciais leves saltam de 227 para 877 mil licenciamentos de veículos novos, a cada ano. Este dado, juntamente com a maior vida

útil de veículos modernos, explica a forte expansão da frota circulante no Brasil, nos últimos anos.

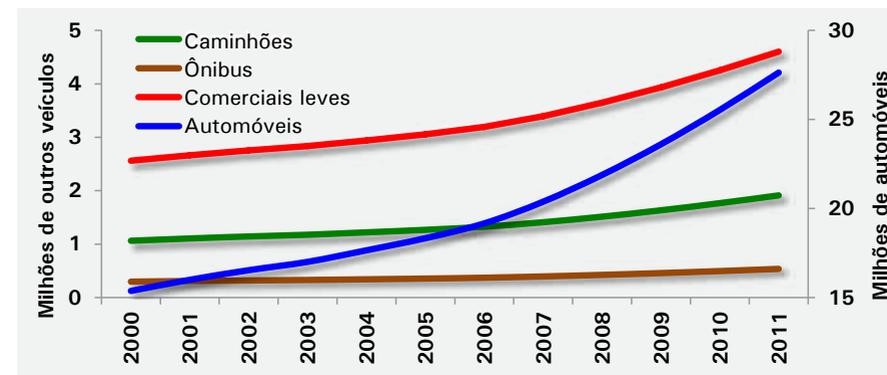


Figura 16. Frota estimada de veículos no Brasil.

Elaboração: D. L. Gazzoni, com dados de ANFAVEA, 2011.

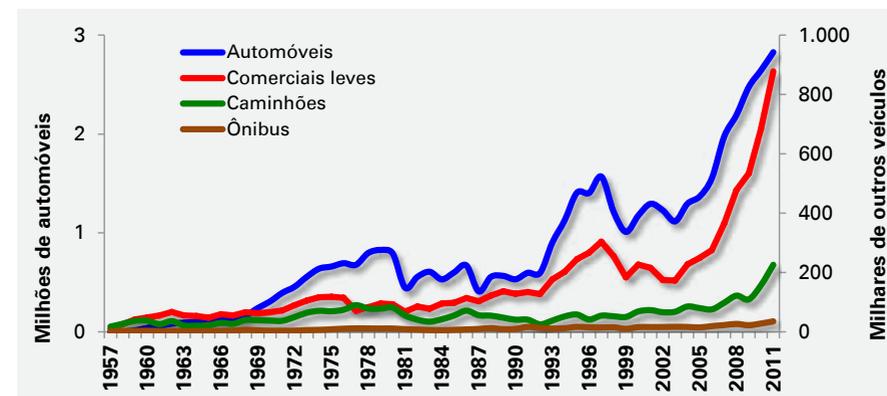


Figura 17. Licenciamentos de veículos novos no Brasil.

Fonte: ANFAVEA, 2011.

Na Figura 18 é possível observar quatro momentos contrastantes do mercado automobilístico no Brasil, em função de alterações tecnológicas, derivadas de pressões do mercado de combustíveis. O primeiro deles vai da implantação da indústria até o início da década de 1980, com predomínio quase absoluto de veículos a gasolina, motivado pelo baixo preço do petróleo.

O segundo momento ocorre durante a década de 1980, após o segundo choque de petróleo, e a implantação do Proálcool, com domínio quase total do mercado pelos veículos movidos a etanol. Entretanto, problemas com políticas públicas e com o mercado de açúcar e etanol, provocaram um refluxo no protagonismo dos veículos a etanol, que perdurou toda a década de 1990 até o início do século XXI.

Em 2003, com o surgimento dos veículos *flex fuel*, que permitem qualquer combinação de abastecimento entre gasolina C e etanol, este segmento dispara, coincidindo com o maior crescimento de vendas de veículos verificado na história da indústria automobilística no país. Entre 2007 e 2011, enquanto o licenciamento anual de veículos movidos exclusivamente a gasolina oscilaram na faixa de 100 a 200 mil unidades anuais, os veículos com tecnologia *flex fuel* passaram de 1,8 para quase 2,7 milhões de novas unidades licenciadas anualmente.

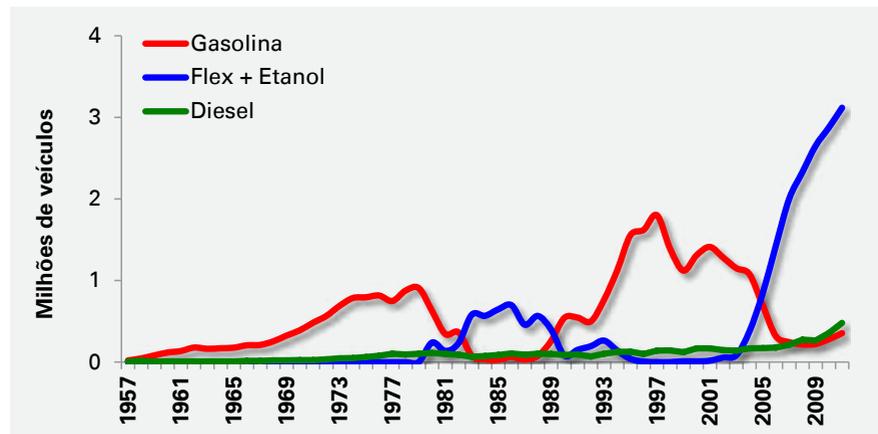


Figura 18. Novos licenciamentos de veículos no Brasil, por combustível.

Fonte: ANFAVEA, 2011.

Não foi apenas o licenciamento e a frota de veículos que cresceu no Brasil, porém, de forma óbvia, a demanda de combustíveis também cresceu, conforme pode ser visualizado na Figura 19.

O óleo diesel é o combustível mais consumido no país, tendo passado de 35,2 para 49,4 bilhões de litros de consumo anual, entre 2000 e

2011. A partir de 2005, o biodiesel passa a ser adicionado ao óleo diesel, inicialmente com 2% (B2) e, a partir de 2010, a adição é de 5% (B5). A gasolina A (sem mistura de etanol anidro), cujo consumo se encontrava estabilizado entre 22 e 25 bilhões de litros (2000 a 2009), tem seu consumo significativamente aumentado a partir de dezembro de 2009, em função da redução da produção de etanol hidratado.

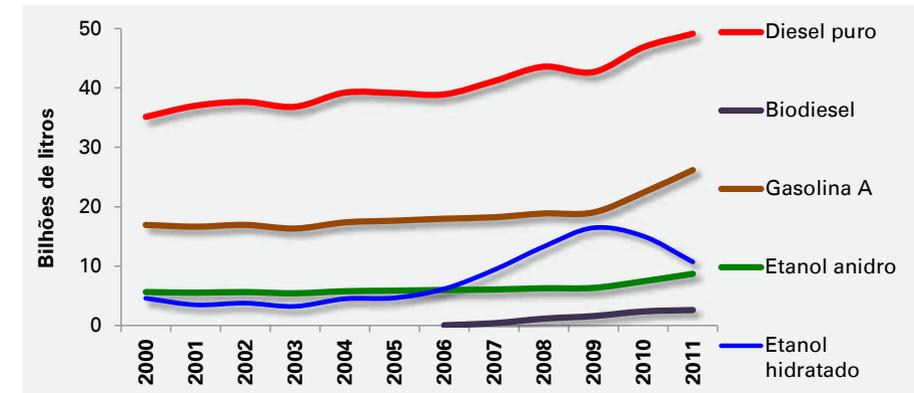


Figura 19. Venda de combustível automotivo no Brasil.

Fonte: ANP, 2012

Esta redução é devida a diversos fatores, mormente: a) disparada do preço do açúcar no mercado internacional, que atingiu a maior cotação da série histórica, em função do aumento da demanda do produto e da frustração de safra da Índia; b) frustração de safra da cana devida às secas consecutivas e às chuvas em momentos não propícios; c) falta de uma política pública clara em relação à produção e ao uso de etanol hidratado; d) crise econômica internacional e incertezas quanto à demanda de mercado e) restrições de financiamento internacional; f) redução dos investimentos na renovação de canais e na construção de novos empreendimentos industriais. Esta sequência de eventos frustrou as projeções de produção (EPE, 2008), sendo a expectativa a retomada da trajetória de ocupação crescente do mercado de combustíveis, em que o etanol (hidratado mais anidro) superou o consumo de gasolina A, durante o período 2008-2010.

A Figura 20 apresenta a estimativa do consumo de combustível por veículo da frota nacional, entre 2000 e 2011.

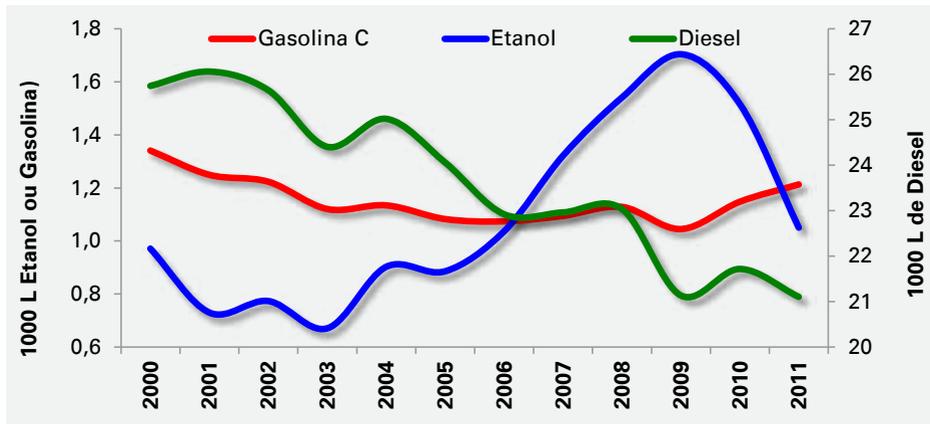


Figura 20. Consumo de combustível por veículo.

Fonte: D. L. Gazzoni com dados de ANFAVEA, 2011 e ANP, 2012.

Para elaborar as estimativas foram utilizados os resultados apresentados nas figuras 19 e 20, estabelecendo um percentual para abastecimento com etanol ou gasolina nos veículos *flex fuel*, com base no preço relativo entre os dois combustíveis, para cada ano. Esta análise é importante pelo abismo entre as emissões líquidas dos três combustíveis.

Na Figura 20 é possível observar três comportamentos distintos:

a. Em relação ao óleo diesel (mormente caminhões e ônibus, porém incluindo parcela dos comerciais leves), há uma clara tendência de diminuição do consumo per capita, com leves oscilações em torno de uma linha tendencial de alta correlação negativa entre os anos e o consumo verificado ( $y = -0,48 + 26,74x - r^2 = 0,93$ ), significando uma redução estimada de 480 litros de óleo diesel consumido por ano por veículo. Algumas explicações possíveis para este comportamento apontam para veículos mais eficientes (carga transportada / consumo unitário de combustível) e a maior participação do uso do modal aeroviário para cargas e passageiros (Tabela 3).

b. O consumo per capita aparente de gasolina segue uma tendência polinomial, cujo consumo diminui até 2006 e torna a subir após esta data, com exceção do ano de 2009 (relação de preços muito favorável ao etanol). A equação que descreve o consumo de gasolina por veículo é  $y = 0,0061x^2 - 0,0918x + 1,4224$  ( $r^2 = 0,89$ ). O consumo de gasolina, estimado para cada veículo, aumenta em 2010 e 2011 pela relação de preços desfavorável ao etanol, cuja oferta no mercado foi reduzida nestes anos.

c. Com referência ao etanol, é possível identificar na Figura 20 três momentos ao longo da década. Inicialmente, o consumo per capita diminuiu (até 2003), provavelmente porque a frota de veículos exclusivamente a etanol, cuja produção em grande escala cessou em 1994, apresentava alta idade média e, pelas leis de mercado, estava concentrada nos segmentos de consumidores de mais baixa renda, cujo baixo poder aquisitivo condiciona a distância rodada anualmente, conseqüentemente limita o consumo de combustível. O segundo momento vai de 2003 a 2009, ou seja, do lançamento dos veículos *flex fuel* ao auge da relação de preços favorável ao etanol, que chegou a 1:2 (etanol:gasolina). O final do período é marcado pela escassez do etanol no mercado, associada com uma alta de preços e relação desfavorável em relação à gasolina, em praticamente todos os estados do Brasil.

A Figura 21 apresenta novamente o consumo médio de gasolina C e de etanol, para automóveis e comerciais leves, contrastados com a curva de consumo de equivalente energético, em que o consumo de combustível per capita de combustível é calculado pelo conteúdo energético (gasolina C = 32,7 MJ/L e etanol 26,4 MJ/L), o que permite uma observação temporal mais precisa do comportamento dos consumidores.

Usando este parâmetro é possível verificar uma redução do equivalente energético entre 2000 e 2003 (de 39 para 33 GJ /veículo/ano), uma ascensão entre 2003 e 2008 (de 33 para 37,7 GJ/veículo/ano) e uma oscilação durante o período 2009 a 2011 variando entre 36,2 e 37,8 GJ/veículo/ano. As emissões veiculares estão

diretamente relacionadas com o tamanho da frota, com o consumo por veículo, com o tipo de combustível e com a eficiência energética dos motores. Portanto, é possível aumentar a equivalência energética do consumo per capita, sem aumentar as emissões, desde que haja um aumento equivalente do uso de biocombustíveis.

De acordo com Mendes (2004), veículos novos rodam 22.000 km anuais e veículos com mais de 11 anos rodam 9.500 km anuais no Brasil. Na média da frota brasileira, um veículo em condições ideais de funcionamento percorre 15,4 km/L de gasolina na estrada e 10,6 km/L na cidade, enquanto o mesmo veículo movido a etanol percorre 11,3 km/L na estrada e 8,3 km/L na cidade. Considerando que a maior quilometragem média de veículos é percorrida na cidade, e assumindo que 75% da distância percorrida seja em trânsito urbano e 25% em estrada, um veículo médio brasileiro, em boas condições de funcionamento, percorreria 11,8 km/L de gasolina e 9,1 km/L de etanol.

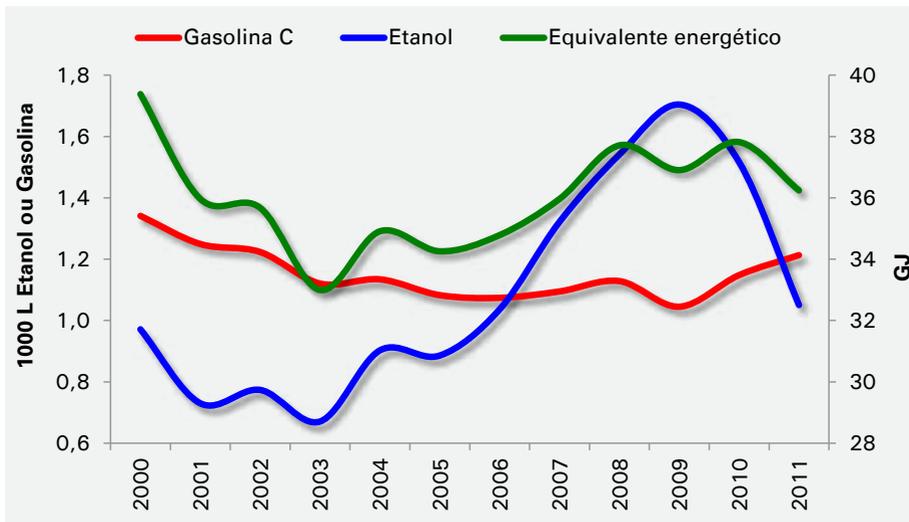


Figura 21. Consumo de combustível por veículo.

Fonte: D. L. Gazzoni com dados de ANFAVEA, 2011 e ANP, 2012.

A Figura 22 apresenta os cálculos efetuados para a quilometragem média percorrida por veículos, de acordo com o combustível utilizado, com base na frota brasileira (ANFAVEA, 2011) e no consumo de combustível (ANP, 2012).

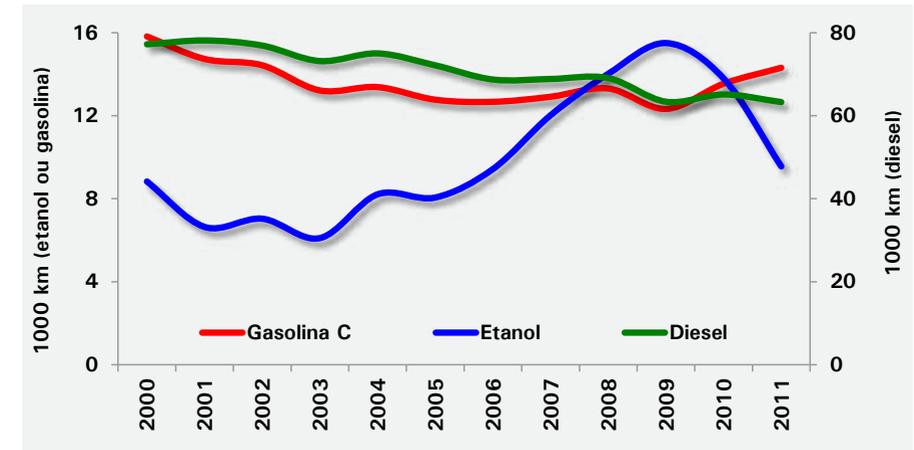


Figura 22. Quilometragem anual rodada por veículo, por combustível.

Pelo exame da Tabela 11 observa-se que, nos países de maior extensão geográfica (EUA, Brasil, Canadá, Austrália), a distância percorrida anualmente por um automóvel é maior que em países de menor dimensão ou com restrições topográficas, como Holanda, Noruega ou Japão. A Dinamarca, a Itália e a Suécia produzem os veículos que percorrem a maior quilometragem com um litro de gasolina, enquanto Canadá, EUA, Austrália e Japão possuem os veículos de mais baixo rendimento.

O preço da gasolina varia entre R\$ 1,31/L (EUA) e R\$ 2,57 (Brasil), e não guarda uma relação direta com a renda per capita do país. Por exemplo, com a renda per capita de um cidadão dos EUA é possível adquirir 36.780 L de combustível por ano, enquanto um cidadão no Brasil adquire apenas 4.615 L ao ano, com a renda per capita de um brasileiro. Como este dado aparentemente é um paradoxo econômico, deveria ser analisada a importância da economia informal ou subterrânea e as fraudes com combustíveis, bem como a sonegação tributária,

para explicar a contradição, o que não é o objeto deste estudo. De qualquer maneira, a lógica econômica indica que preço mais elevado inibe o consumo, diminuindo as emissões. Por este raciocínio, a renda per capita mais baixa e o combustível mais caro diminuiriam as emissões do Brasil.

**Tabela 11. Parâmetros de uso de automóvel no mundo**

País	1000 km anuais (A)	Rendimento km/L (B)	Preço L gasolina (C)	Renda per capita US\$ (D)	D/C
EUA	13,0	8,33	1,31	48.147	36,78
Canadá	8,2	8,70	1,62	40.457	25,05
Austrália	8,2	8,55	1,58	40.836	25,83
Dinamarca	7,0	13,16	2,82	37.741	13,37
Finlândia	7,5	12,05	2,96	36.723	12,41
Itália	7,1	13,70	2,70	30.165	11,16
Reino Unido	6,4	12,20	3,26	35.974	11,02
Suécia	6,3	13,89	2,62	40.613	15,51
Alemanha	6,2	11,24	2,53	37.935	14,98
França	6,1	12,99	2,75	35.048	12,73
Holanda	6,0	12,66	2,87	42.330	14,73
Noruega	5,5	11,90	2,06	53.376	25,95
Japão	3,8	8,62	2,96	34.362	11,62
Brasil	14,3	11,81	2,57	11.845	4,61

Fonte: (A, B) = Adaptado de Schipper, 2007;.

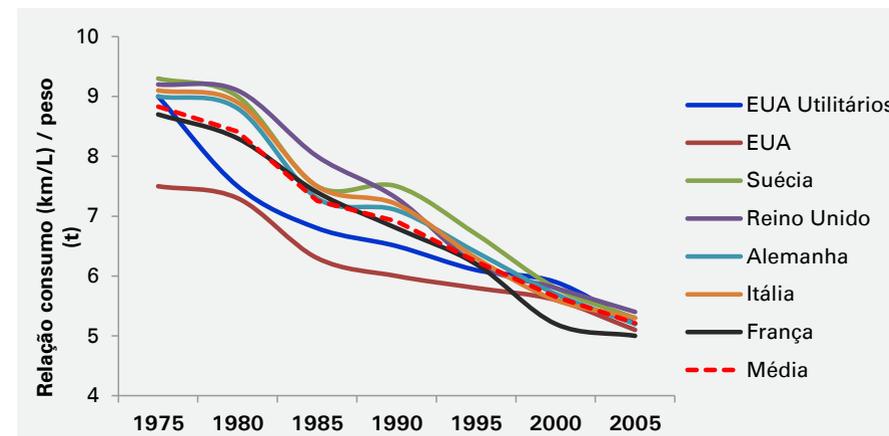
(C) = [http://www.nationmaster.com/graph/ene\\_gas\\_pri-energy-gasoline-prices](http://www.nationmaster.com/graph/ene_gas_pri-energy-gasoline-prices); R\$/L

(D) = <http://www.indexmundi.com/g/r.aspx?v=67>; Taxa de câmbio: US\$1,00 = R\$1,70

A eficiência veicular é expressa como a energia necessária para mover uma dada massa a uma determinada distância, ou a energia necessária para fornecer um dado nível de potência a um motor, ou ainda para extrair uma determinada quantidade de energia a partir de um determinado volume de combustível. A eficiência veicular, que tem uma alta correlação negativa com as emissões veiculares, tem aumentado acentuadamente nos EUA e na Europa.

Quando é dividido o consumo de combustível (energia) pelo peso do veículo (massa) ou pela sua potência, obtêm-se indicadores de eficiência,

que tem como externalidade positiva a redução das emissões veiculares. A Figura 23 revela uma grande queda no uso do combustível necessário para mover um veículo, entre 1975 e 2005. Este fenômeno ocorreu conjuntamente com melhoria do desempenho geral dos veículos, como maior aceleração e velocidade final mais alta, pois, como mostra a Figura 24, houve uma tendência de melhorar a relação consumo / peso em todos os países, no mesmo período.



**Figura 23.** Evolução da relação consumo/peso de veículos, de 1975 a 2005, em alguns países.

Fonte: Schipper, 2007.

Uma relação mais baixa de consumo em relação à potência indica que o motor é mais eficiente, provendo mais potência para uma mesma média de consumo. Portanto, veículos mais eficientes, que deslocam mais massa e consomem menos combustível, significam menor emissão de poluentes.

Infelizmente, o mote do período não foi a busca da sustentabilidade, porém de performance, ou seja, os consumidores desejavam veículos maiores e mais potentes, sendo a redução de emissões uma consequência, pois, mantida a tecnologia anterior, o aumento da potência, do tamanho e da performance dos veículos significaria maiores emissões per capita.

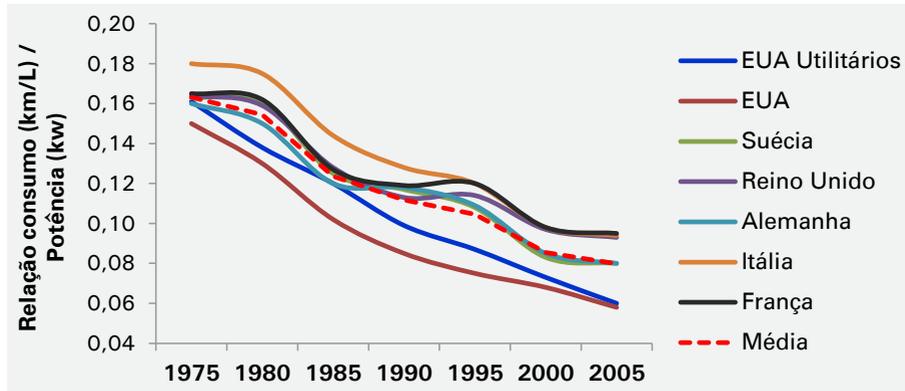


Figura 24. Evolução da relação consumo / potência de automóveis, de 1975 a 2005, em alguns países.

Fonte: Schipper, 2007.

As inovações futuras deverão focar na redução das emissões como objetivo diretriz, o que inclui redução do peso (materiais mais leves e resistentes) e motores mais eficientes e econômicos, sendo a melhoria da performance e a redução do custo com combustível as externalidades positivas, o que significaria uma inversão total do enfoque.

## 5. Emissões dos biocombustíveis

Ao longo do ciclo de vida de combustíveis e biocombustíveis ocorre a emissão de diversos gases de efeito estufa (GEE), como monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos voláteis (HC), além de vapor d'água (H<sub>2</sub>O). Para facilitar as comparações e cálculos, o conjunto de emissões de GEE é expresso sob a forma de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq), considerando o poder de aquecimento global (GWP, na sigla em inglês) de cada gás, ao longo de um período de 100 anos, comparativamente ao dióxido de carbono. Por exemplo, o metano possui GWP = 23 e os NO<sub>x</sub> = 296, significando que um grama de um óxido de nitrogênio equivale a 296 g de CO<sub>2</sub>, para o cálculo de CO<sub>2</sub> eq.

Entretanto, para efeitos práticos, há dois aspectos a considerar. O primeiro deles é que a grande emissão de GEE ocorre na fase de combustão no motor, podendo superar a 80% do total de emissões. O segundo aspecto é que o dióxido de carbono representa o maior volume de emissões ao longo de todo o ciclo de vida de um combustível ou biocombustível, quando comparado aos demais GEE. Portanto, para efeitos práticos, as emissões de CO<sub>2</sub> são uma boa estimativa do conjunto de emissões do ciclo de vida, e serão utilizadas doravante.

Tanto os combustíveis fósseis, derivados de petróleo, quanto os biocombustíveis, são moléculas orgânicas, cujo primeiro elo da cadeia é a fotossíntese. A diferença essencial entre ambos, do ponto de vista de emissões, é que os combustíveis derivados de petróleo utilizam para a combustão o carbono das moléculas que estava estocado há centenas de milhões de anos nas jazidas petrolíferas, emitindo dióxido de carbono para a atmosfera em um ciclo de carbono semi-aberto<sup>6</sup>, alterando a composição química da atmosfera. No caso dos biocombustíveis, o ciclo de carbono é fechado, ou seja, todo o carbono emitido para atmosfera durante a combustão é reabsorvido no ciclo seguinte, para produção da mesma quantidade de biocombustível.

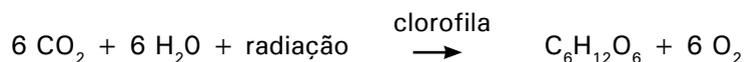
Para a síntese de substâncias orgânicas, as plantas utilizam uma reação básica chamada de fotossíntese, onde são geradas moléculas que, posteriormente, são derivadas em cadeias complexas de reações bioquímicas, para produzir substâncias específicas. Na fotossíntese, a energia luminosa (radiação) é captada por pigmentos fotossintetizantes presentes na planta, através dos quais a energia é carregada ao sítio de reação. O sítio é conformado por um par de clorofilas 'A', conhecidas como P<sub>700</sub> por absorverem a onda luminosa na faixa de 700 nanômetros.

<sup>6</sup> Considera-se ciclo semi-aberto pois parte do carbono lançado à atmosfera pelos combustíveis fósseis é reabsorvida na fotossíntese, em virtude do aumento constante da área plantada e do rendimento das culturas, que exigem mais carbono que aquele que haveria na atmosfera, em um ciclo exclusivamente fechado. Desta forma, a própria produção de biocombustíveis, a partir de matérias primas vegetais, é uma forma de reduzir o impacto da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pelos combustíveis fósseis, posto que nem todo o C absorvido é emitido, sendo parte dele seqüestrado e imobilizado como matéria orgânica no solo.

Os elétrons excitados da P<sub>700</sub> migram para a ferredoxina, que é a primeira aceptora de elétrons da reação. A ferredoxina transfere os elétrons para outra substância aceptora que, por sua vez os transfere para outro acceptor, em uma sequência que cria uma cadeia de transporte de elétrons. Tais substâncias aceptoras estão presentes na membrana do tilacóide, que são os sistemas de membranas internas do cloroplasto que contêm as moléculas de clorofila, constituindo-se no sítio das reações de luz da fotossíntese.

Nessa transferência entre os aceptores, os elétrons vão liberando energia gradativamente e esta é aproveitada para transportar hidrogênio iônico de fora para dentro do tilacóide, reduzindo o seu pH interno, fenômeno que ativa a enzima ATP sintetase. O fluxo de hidrogênio iônico através do complexo gira, em seu interior, um sistema complexo denominado “turbina proteica”, responsável pela fosforilação de moléculas de adenosina-difosfato (ADP) que, com a adição de mais um átomo de Fósforo, produz a adenosina trifosfato (ATP), que é um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia em suas ligações químicas, uma espécie de reserva de energia das plantas. Ao chegarem ao último acceptor, os elétrons têm nível energético suficientemente baixo e retornam ao par de clorofilas ‘A’, para iniciar um novo ciclo de reação.

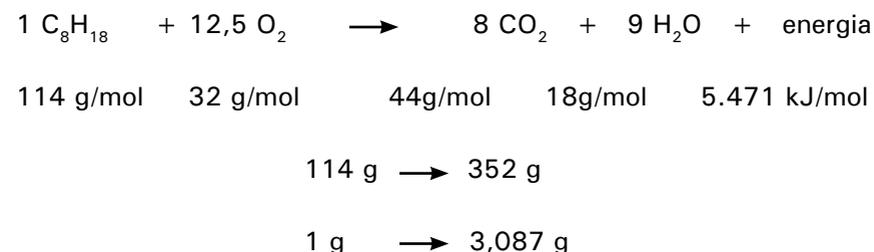
A reação da fotossíntese é essencialmente endotérmica, ou seja, utiliza uma fonte de energia externa (radiação) para armazenar energia química nas moléculas, a qual será liberada, posteriormente, nas reações exotérmicas de combustão. A equação paradigma que sintetiza o descrito é:



Já a combustão é uma reação química exotérmica. As substâncias químicas, com alto potencial energético, reagem com o oxigênio do ar, a uma determinada temperatura e pressão, gerando novas substâncias químicas e energia, a menor parte dela aproveitada como energia

mecânica e, a maior parte desperdiçada como calor. A relação entre a energia potencial contida no combustível e aquela efetivamente aproveitada como energia mecânica útil é a eficiência do motor, que gira entre 30 a 40%.

A geração de poluentes atmosféricos depende da composição do combustível, da quantidade, do tipo de queima e da tecnologia empregada no processo. Os hidrocarbonetos, que compõem o petróleo e seus derivados, são substâncias químicas constituídas principalmente por carbono e hidrogênio, embora contenham enxofre e outros átomos. Reações químicas paralelas que ocorrem durante a combustão forçam a reação do Nitrogênio atmosférico com o Oxigênio, gerando uma pequena parcela de NO<sub>x</sub>, que é um potente GEE. Um exemplo da combustão do octano, o hidrocarboneto paradigma da gasolina<sup>7</sup>, é apresentado na equação abaixo, onde, além da reação química é mostrado o cálculo estequiométrico e a relação entre o combustível reagente e o dióxido de carbono resultante.



Pela equação acima, verifica-se que, apenas com a combustão do hidrocarboneto padrão octano, presente na gasolina, são gerados 3,087 vezes a sua massa em forma de dióxido de carbono. Como a densidade do octano é de 0,7 g/cm<sup>3</sup>, com a queima de um litro (700 g) de octano são gerados 2,161 g de CO<sub>2</sub>, ao final da sua combustão. No caso do octano, a proporção de carbono sobre o total do peso da molécula é de 84%, mas a gasolina costuma ter cerca de 87% de carbono, pois além de octano a gasolina possui em sua composição outros hidrocarbonetos, como heptano, nonano e decano. Com 87% de carbono na

<sup>7</sup> Se a gasolina fosse composta apenas de octanos, teria 100 octanas.

composição, a combustão de um litro de gasolina emite 2.430 g de CO<sub>2</sub>. No caso do etanol a equação que descreve a reação, bem como os cálculos estequiométricos e as emissões decorrentes é a seguinte:



46 g/mol    32 g/mol    44 g/mol    18 g/mol    1.368 kJ/mol

46 g                    →    88 g

1 g                     →    1,913 g

Desta forma, a combustão de um litro de etanol, com densidade de 0,789 g/cm<sup>3</sup> gera 1.509 g de CO<sub>2</sub>.

### 5.1. Estudos de ciclo de vida e parâmetros utilizados

As propriedades físicas e energéticas dos combustíveis e biocombustíveis, utilizadas para os cálculos, estão apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12.** Parâmetros de combustíveis e biocombustíveis.

Combustível	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	PCI (MJ/kg)
Gasolina A	740	43,0
Gasolina C	720	37,6
Etanol Hidratado	789	26,3
Etanol Anidro	788	28,3
Diesel	830	42,1
Biodiesel	860	39,6

Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor que pode produzir 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada. O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). Para estabelecer a quantidade de emissões de

cada combustível ou biocombustível, é necessário analisar o seu ciclo de vida, em especial o consumo de energia ao longo da cadeia. Para a produção de derivados de petróleo, como gasolina e diesel, Weiss et al. (2000) calcularam a eficiência do processo completo (extração, refino, e distribuição) em torno de 80 a 90% (Tabela 13). A interpretação dos dados da tabela é a seguinte: para a extração do petróleo que irá produzir gasolina, é utilizado 0,042MJ para cada MJ extraído, o que corresponde a uma eficiência de 96,5%. No total do ciclo, a eficiência para a gasolina é de 82,6% e para o diesel 87,8%. Este cálculo presume a produção local e o refino próximo aos poços de petróleo, portanto com emissões desprezíveis no transporte do poço à refinaria.

**Tabela 13.** Resumo do ciclo de vida de derivados de petróleo.

Etapa	Gasolina		Diesel	
	Consumo (MJ/MJ)	Eficiência (%)	Consumo (MJ/MJ)	Eficiência (%)
Extração	0,042	96,5	0,042	96,5
Refino	0,157	86,6	0,089	91,9
Distribuição	0,012	98,3	0,139	87,8
Total	0,211	82,6	0,139	87,8

Fonte: Weiss et al., 2000.

Considerando os pesos atômicos do Carbono e do Oxigênio, a relação de massa entre o Carbono e o Dióxido de Carbono é de 1:3,67. Desta forma, utilizando os valores fornecidos por IPCC (1996) é possível calcular as emissões pela oxidação dos átomos de carbono presentes na gasolina (18,9 tC/TJ), que emite 69,4 g CO<sub>2</sub>/MJ; do diesel (20,2 tC/TJ), que emite 74,1 g CO<sub>2</sub>/MJ; e do etanol (14,8 tC/TJ), que emite 57,3 g CO<sub>2</sub>/MJ.

A Tabela 14 apresenta o balanço de energia do bioetanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil. De acordo com Macedo et al. (2008), a relação entre energia fóssil (entrada) e renovável (saída) foi de 1:9,3, para o levantamento efetuado na safra 2005/2006, sendo projetada uma relação de 1:11,6 para o ano de 2020.

Para a produção de bioetanol anidro o total de emissões calculado por Macedo et al. (2008) foi de 436 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup>, para a safra 2005/2006, decrescendo para 345 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup> em 2020, tendo sido de 401 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup> em 2002. Para o etanol hidratado, o valor obtido em 2002 foi de 390 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup>, que se elevou a 417 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup> em 2005/2006, sendo projetado para 330 kg CO<sub>2</sub> equivalente / m<sup>3</sup> em 2020 (Tabela 15). Os valores são equiparáveis ao descrito por Beeharry (2001).

**Tabela 14.** Balanço de energia da produção de cana no Brasil.

Componente	2005/2006	Projeção 2020
<b>Entrada de energia (MJ/t cana)</b>		
Produção e transporte de cana	210,2	238,0
Produção de bioetanol	23,6	24,0
Total de energia fóssil	233,8	262,0
<b>Saídas de energia (MJ/t cana)</b>		
Bioetanol	1.926,0	2.060,0
Bagaço excedente	176,0	0,0
Eletricidade excedente	82,8	972,0
Total de energia renovável	2.185,0	3.032,0
<b>Relação entrada / saída de energia (fóssil / renovável)</b>		
Bioetanol + bagaço	9,0	7,9
Bioetanol + bagaço + eletricidade	9,3	11,6

Fonte: Macedo et al. (2008).

**Tabela 15.** Emissões na produção de bioetanol em kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>

Emissões	2002		2005/2006		Projeção 2020	
	H	A	H	A	H	A
Energia fóssil	217	223	201	210	210	219
Queima palha	102	105	80	84	0	0
Solo	71	73	136	143	120	126
Total	390	401	417	436	330	345

Fonte: Macedo et al. (2008).

A Tabela 16 apresenta um consolidado do consumo de energia fóssil na produção de biodiesel, considerando diferentes matérias primas. Os valores estão congruentes com outros resultados obtidos no Brasil, como os obtidos por Gazzoni et al. (2005); Gazzoni et al. (2008); Gazzoni et al. (2009) e Gazzoni et al. (2010). H = Hidratado; A = Aidro.

**Tabela 16.** Consumo de energia fóssil para produção de biodiesel.

Fase	Unidade	Soja	Mamona	Dendê	Sebo
Agronômica	MJ/kg óleo ou sebo	7,2	25,0	2,6	0,6
Industrial	MJ/kg biodiesel	5,0	11,2	8,9	5,4
Total	MJ/kg biodiesel	12,1	36,2	11,5	6,0

Fonte: Nogueira, 2008.

A matéria prima mais eficiente do ponto de vista do balanço de energia é o sebo bovino, um subproduto da indústria de carnes, que apresenta uma demanda baixa de energia fóssil, tendo em vista o sistema de produção dominante no Brasil, que é a criação extensiva no pasto. Comparados ao sebo, os óleos de soja e de dendê necessitam o dobro de energia fóssil requerida para a produção da mesma quantidade de matéria prima a partir do sebo. A gordura de frango já é utilizada para produção de biodiesel no Brasil, embora em quantidades incipientes, não se dispondendo de resultados sobre suas emissões.

A Tabela 17 sintetiza as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do biodiesel, separando as fases agronômica e industrial, de acordo com as diferentes matérias primas.

Observa-se que, tanto no balanço de energia, em que a mamona requer três vezes mais energia fóssil que soja ou dendê e seis vezes mais que o sebo, quanto nas emissões, em que o biodiesel de mamona emite três vezes mais que a soja ou seis vezes mais que o sebo, esta matéria prima se mostra inadequada para a produção de biodiesel. Este fato apenas reafirma a conclusão do mercado da insustentabilidade econômica do uso de mamona para produção de biodiesel.

**Tabela 17.** Emissões na produção de biodiesel.

Fase	Unidade	Soja	Mamona	Dendê	Sebo
Agronômica	g CO <sub>2</sub> eq/kg biodiesel	685,2	2.394,7	133,2	54,3
Industrial	g CO <sub>2</sub> eq/kg biodiesel	426,1	920,4	734,7	457,6
Total	g CO <sub>2</sub> eq/kg biodiesel	1.111,3	3.315,1	868,0	512,0

Segundo Weiss et al. (2000), as emissões europeias de dióxido de carbono, para a média dos veículos leves, se situavam em 187 g/km em 1995, com metas de redução para 140 g/km (2008) e 120 g/km (2012). A Tabela 18 ilustra o exposto, com alguns exemplos de veículos leves, de diversas marcas, em diferentes mercados, observando-se que as menores emissões são verificadas no Japão e as maiores nos EUA, situando-se a União Européia em posição intermediária.

Com base no exposto, para os cálculos das emissões de biocombustíveis no Brasil foram considerados a) o consumo médio de combustíveis e biocombustíveis; b) as vendas de combustíveis e biocombustíveis por distribuidoras ([www.anac.gov.br](http://www.anac.gov.br)); c) as emissões em CO<sub>2</sub> equivalente de diesel (2.970 g CO<sub>2</sub> eq / L) (IPCC, 1996; EGGLESTON et al., 2005; CETESB, 2012; WEISS et al., 2000); de gasolina A (2.676 g CO<sub>2</sub> eq/L) (IPCC, 1996; EGGLESTON et al., 2005; WEISS et al., 2000); as emissões líquidas em CO<sub>2</sub> equivalente de etanol anidro de cana (401 – 436 g CO<sub>2</sub> eq / L) (MACEDO et al., 2008); e as emissões líquidas do etanol hidratado de cana (390 - 417 g CO<sub>2</sub> eq / L) (MACEDO et al., 2008).

Para o biodiesel, foi considerado um mix médio da matéria prima de 82% de óleos vegetais, tendo como paradigma o óleo de soja e 18% de sebo bovino, o que se aproxima da média histórica do mix de matérias primas para produção de biodiesel no Brasil (Figura 25). De acordo com Nogueira (2011), o biodiesel de óleo de soja apresenta emissões líquidas de 955 g CO<sub>2</sub> eq / L; e do sebo bovino de 440g CO<sub>2</sub> eq / L. No mix considerado, o biodiesel brasileiro apresenta

emissões de CO<sub>2</sub> equivalente de 862 g/L. Ressaltando que o cálculo de emissões considera não apenas os gases emitidos por ocasião da combustão no motor, porém em todo o ciclo de vida, incluindo os créditos por reabsorção para a fase agronômica dos biocombustíveis.

Na projeção para a presente década, até 2020, foram mantidos os valores de emissões para os combustíveis fósseis (gasolina e diesel), utilizando as variações das estimativas de Macedo et al. (2008) para o etanol anidro (345 g CO<sub>2</sub> eq / L) e hidratado (330 g CO<sub>2</sub> eq / L), em função do cenário.

Para o biodiesel, foi considerado um ganho similar de 20% de redução de emissões, devido: à curva de aprendizagem de um produto que tem apenas 6 anos de experiência comercial; ao incremento sustentável da produtividade agrícola e pecuária, com maior produção com o mesmo consumo de energia; e com a expansão das áreas de produção extensiva de dendê, em função do programa de incentivo à cultura promovido pelo Governo Federal, tendo em conta que o óleo de dendê emite 78% do CO<sub>2</sub> emitido pelo óleo de soja.

**Tabela 18.** Taxa de emissões de veículos.

Marca	Emissões g CO <sub>2</sub> /km		
	EUA	UE	Japão
BMW	251	214	
Daimler Chrysler	282	234	230
Ford	295	196	212
GM	293	181	143
Honda	214	174	174
Nissan	242	159	185
PSA	-	166	-
Renault	242	149	185
Toyota	245	180	200
Volkswagen	220	179	-
Média	228	204	190

Fonte: Adaptado de Lorenzi, 2009.

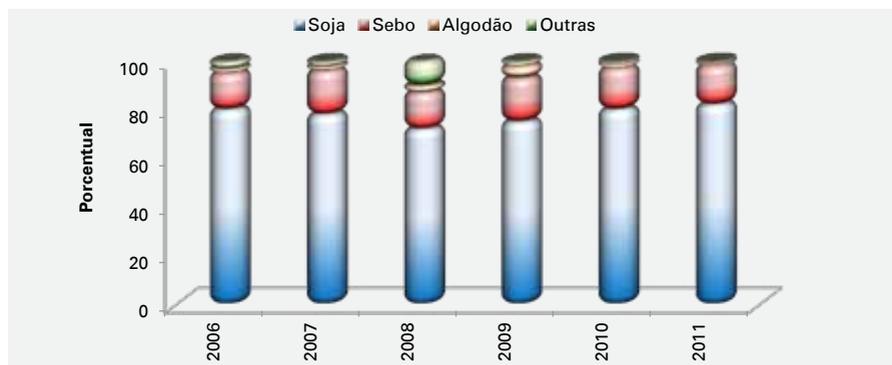


Figura 25. Mix de matéria prima para produção de biodiesel no Brasil.

Fonte: Furlan, 2011.

## 5.2. Resultados de emissões do etanol anidro e hidratado

A Tabela 19 mostra o consumo de etanol anidro (misturado à gasolina) e hidratado (consumo de livre escolha) no Brasil, no período compreendido entre 2000 e 2011. Entre 2000 e 2005, o consumo de álcool anidro foi maior que o hidratado, que assume posição de liderança a partir do surgimento dos veículos *flex fuel*. Entretanto, em função da redução da produção de etanol, nos anos de 2010 e 2011, ocorre um aumento relativo do consumo de etanol anidro e redução do consumo de etanol hidratado.

Tabela 19. Consumo de Etanol.

Ano	GL de Etanol	
	Hidratado	Anidro
2000	4,60	5,66
2001	3,50	5,55
2002	3,79	5,65
2003	3,25	5,45
2004	4,51	5,79
2005	4,67	5,89
2006	6,19	6,00
2007	9,37	6,08
2008	13,29	6,29
2009	16,47	6,35
2010	15,07	7,46
2011	10,73	8,73

Fonte: ANP, 2012.

A partir do consumo de etanol foram calculadas as emissões líquidas, ou seja, as emissões de CO<sub>2</sub> efetivamente ocorridas, descontadas as reabsorções do ciclo de carbono fechado, conforme exposto na Tabela 14, interpolando os valores obtidos para 2002 e 2005/2006 para cada ano calculado. O cálculo do consumo de gasolina equivalente, tanto no caso de não haver mistura de gasolina A com etanol anidro, quanto no consumo de etanol hidratado em substituição à gasolina C, foi efetuado de acordo com os parâmetros de densidade e PCI apresentados na Tabela 12.

A Figura 26 apresenta as curvas referentes às emissões do etanol hidratado consumido no período 2000-2011, conjuntamente com o consumo equivalente (evitado) de gasolina, as emissões referentes ao consumo evitado e as emissões líquidas evitadas.

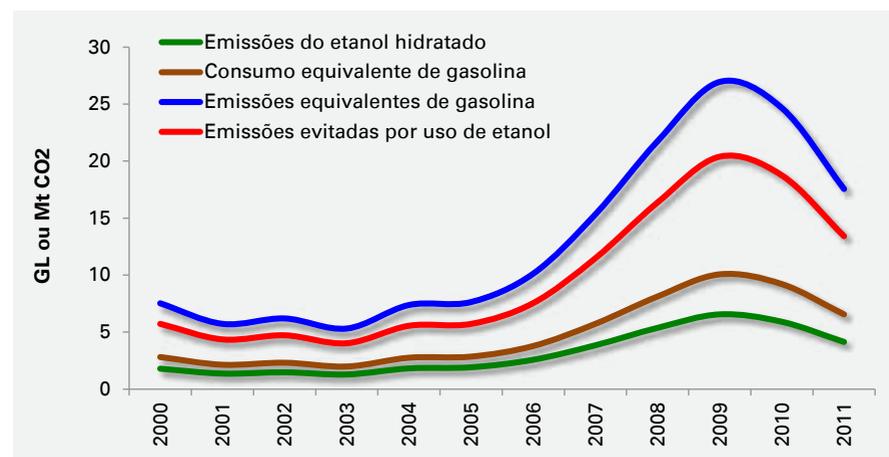


Figura 26. Emissões de etanol hidratado e emissões evitadas.

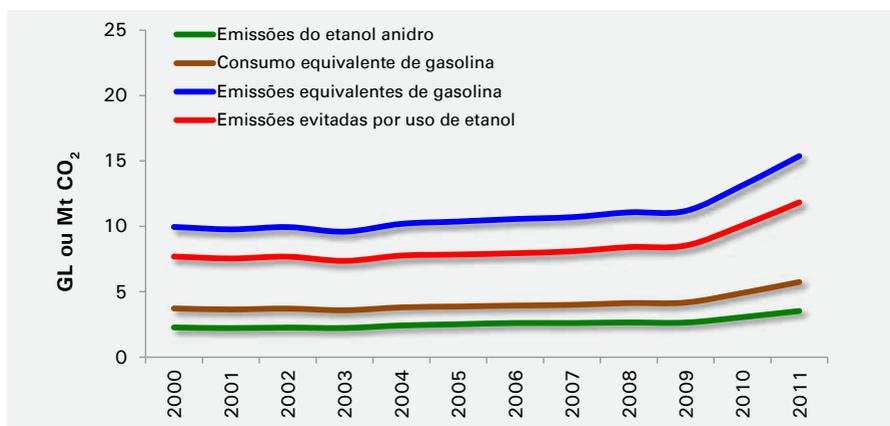
A Tabela 20 consolida os totais do período, verificando-se que os 95 bilhões de litros de etanol hidratado consumidos ocasionaram 38 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> entre 2000 e 2011, porém evitaram emissões de 118 milhões de toneladas, pelo seu uso em substituição a 58 bilhões de litros de gasolina.

**Tabela 20.** Totais de consumo e emissões com etanol hidratado.

Fator	Unidade	Total
Consumo de etanol hidratado	GL	95,44
Emissões do etanol hidratado	Mt CO <sub>2</sub>	38,09
Consumo equivalente de gasolina A	G L	58,37
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	156,21
Emissões evitadas por uso de etanol hidratado	Mt CO <sub>2</sub>	118,12

A Figura 27 apresenta as curvas de emissões referentes ao uso de etanol anidro, as emissões equivalentes à gasolina A substituída e as emissões evitadas. Observa-se uma relativa estabilidade em todos os valores entre 2000 e 2009, resultado da redução do consumo relativo de gasolina no período, substituída pelo uso crescente de etanol hidratado.

A Tabela 21 apresenta os valores de consumo e emissões de etanol anidro, no período. Verifica-se um consumo total de 75 bilhões de litros de etanol anidro entre 2000 e 2011, que substituiu 49 milhões de litros de gasolina A. As emissões referentes ao etanol anidro, no período, foram de 31 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, com emissões evitadas de 100 milhões de toneladas, por evitar o consumo de 49 bilhões de litros de gasolina.

**Figura 27.** Emissões de etanol anidro e emissões evitadas.**Tabela 21.** Totais de consumo e emissões com etanol anidro.

Fator	Unidade	Total
Consumo de etanol anidro	GL	74,90
Emissões do etanol anidro	Mt CO <sub>2</sub>	31,08
Consumo equivalente de gasolina	G L	49,29
Emissões equivalentes de gasolina	Mt CO <sub>2</sub>	131,91
Emissões evitadas por uso de etanol anidro	Mt CO <sub>2</sub>	100,84

A Tabela 22 apresenta os valores referentes ao consumo de gasolina A, obtida da comercialização de gasolina C (ANP, 2012), descontado o volume de etanol anidro adicionado a cada ano.

**Tabela 22.** Consumo e emissões de gasolina A.

Ano	Consumo	Emissões
	G L	G t CO <sub>2</sub>
2000	16,97	45,41
2001	16,66	44,58
2002	16,96	45,38
2003	16,34	43,73
2004	17,38	46,51
2005	17,67	47,28
2006	18,01	48,19
2007	18,24	48,81
2008	18,88	50,52
2009	19,06	51,00
2010	22,38	59,89
2011	26,19	70,08
Total	224,74	601,40

Verifica-se no período um consumo total de 224 bilhões de litros, em contraste com 170 bilhões de litros de etanol (hidratado e anidro). Pelas Tabelas 20 e 21 verifica-se que, na ausência de etanol, o consumo de gasolina teria sido acrescido de 107 bilhões de litros (48%), em

termos de equivalente energético, totalizando uma redução superior a 288 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Desta forma, o poder de mitigação do etanol, em relação às emissões de gasolina, foi de 77,6% (emissões havidas com etanol / emissões que haveria com gasolina).

### 5.3. Emissões do biodiesel

A série histórica de produção e uso do biodiesel, no Brasil, inicia-se em 2005, com a Lei 11.097. A Figura 28 apresenta as curvas de emissões do biodiesel, o consumo de diesel equivalente e as emissões evitadas. Observa-se o aumento crescente, a partir de 2006, no volume de diesel substituído e nas emissões evitadas, com o incremento do uso de biodiesel, que passou de B2 para B5, entre 2006 e 2010, como parte da política pública setorial.

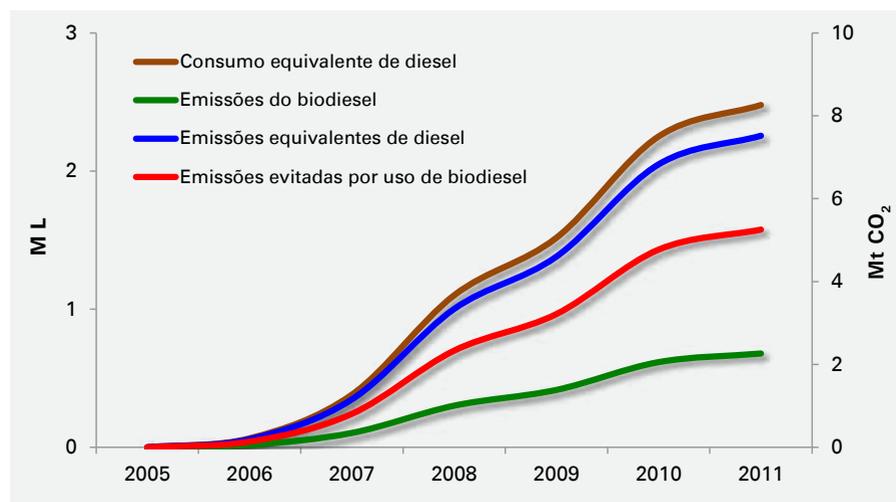


Figura 28. Consumo equivalente de diesel, emissões de biodiesel e emissões evitadas.

A Tabela 23 mostra os totais de consumo e emissões do período 2005-2011, onde se verifica um consumo total superior a 8 bilhões de litros de biodiesel, com emissões de 7,12 Mt CO<sub>2</sub>, porém evitando emissões de 16 Mt de CO<sub>2</sub>, que teriam ocorrido pelo consumo adicional de 7,8 bilhões de litros de diesel, que foi evitado pela substituição por biodiesel.

Tabela 23. Totais de consumo e emissões com biodiesel.

Fator	Unidade	Total
Consumo de biodiesel	GL	8,26
Emissões do biodiesel	Gt CO <sub>2</sub>	7,12
Consumo equivalente de diesel	G L	7,80
Emissões equivalentes de diesel	Gt CO <sub>2</sub>	23,65
Emissões evitadas por uso de biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	16,53

Observa-se na Tabela 24 um comparativo entre o consumo de diesel e de biodiesel e as respectivas emissões. No mesmo período (2000-2011), as emissões devidas ao uso de gasolina A (Tabela 22) representaram apenas 42% daquelas que ocorreram com o uso de diesel, apesar de o fator de emissões devido à combustão da gasolina equivaler a 87% daquelas verificadas com diesel. Este fato aponta para o uso mais intenso do diesel no Brasil, sendo este mais poluente que a gasolina. Esta verificação apenas demonstra, de forma recorrente, a imperiosa necessidade de avançar em soluções para substituição do diesel de petróleo, como parte do programa brasileiro de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 24. Consumo e emissões de diesel e biodiesel.

Ano	Diesel		Biodiesel		Total	
	Consumo GL	Emissões Mt CO <sub>2</sub>	Consumo GL	Emissões Mt CO <sub>2</sub>	Consumo GL	Emissões Mt CO <sub>2</sub>
2000	35	104			35	104
2001	37	110			37	110
2002	38	112			38	112
2003	37	109			37	109
2004	39	117			39	117
2005	39	116	0,001	0,001	39	116
2006	39	116	0,069	0,059	39	116
2007	41	122	0,404	0,349	42	123
2008	44	129	1,167	1,006	45	130
2009	43	127	1,608	1,386	44	128
2010	47	139	2,386	2,057	49	141
2011	49	146	2,628	2,265	52	148
Total	487	1.448	8,264	7,123	496	1.455

## 5.4. Projeção de emissões no período 2012-2020

Para efetuar os cálculos das estimativas referentes às projeções do período 2011-2020, foram utilizando fatores como a taxa esperada de crescimento da frota brasileira, em função do crescimento econômico do período e do aumento da renda per capita. Considerou-se, também, o aumento da quilometragem rodada por veículo para estabelecer o crescimento do consumo de combustíveis e biocombustíveis. Os dados foram trabalhados em um modelo matemático que calculou o *market share* de cada combustível, as emissões dos combustíveis e biocombustíveis e as emissões evitadas. Para analisar a sensibilidade do modelo à ação do Governo, foram traçados três cenários possíveis, sobre a mesma base de crescimento médio da frota e do consumo total de combustíveis:

- a. Cenário *Business as Usual* (BAU), em que as políticas atualmente vigentes seriam mantidas sem alteração (mistura de 20-25% de etanol anidro na gasolina A e mistura de 5% de biodiesel no diesel), bem como mantendo a mesma taxa de emissões da década anterior para os combustíveis e biocombustíveis, com exceção do biodiesel;
- b. Cenário progresso (PRO), no qual seria concedido incentivo moderado tanto à melhoria tecnológica da produção de matéria prima, quanto para produção e uso de biocombustíveis;
- c. Cenário Sustentável (SUS), em que seria efetuado um grande esforço de ganho tecnológico na produção da matéria prima, seriam incentivados a produção e o uso de biocombustíveis e seria zerado o passivo de infraestrutura de transporte, ao tempo em que a política pública de uso compulsório ou voluntário seria agressiva.

Considerando que o biodiesel é proporcionalmente mais dependente de políticas públicas para sua consolidação que o etanol, os cenários PRO e SUS consideraram atuações mais ambiciosas do Governo Federal em

relação ao marco regulatório do biodiesel, conforme exposto na Tabela 25.

O Plano de Metas elaborado pela Presidência da República do Brasil estabeleceu como meta governamental um crescimento médio do PIB de 7% ao ano, entre 2011 e 2022 (SAE, 2010). O mesmo documento também prevê duplicar o consumo per capita de energia, embora com maior proporção de energia elétrica, no mesmo período.

Em virtude do aprofundamento da crise financeira internacional, foi considerado um rebate no índice previsto no documento, trazendo-o para um patamar mais conservador de 4,5%. Mesmo considerando evoluções positivas no índice de Gini e na distribuição de renda excessivamente desigual no Brasil, não será possível atingir a meta de duplicar o consumo per capita de energia.

Desta forma, projetando o crescimento da frota compatível com o crescimento da economia acima exposto, e a tendência de redução do consumo per capita dos veículos pesados (ônibus e caminhões), e o aumento da participação do modal aeroviário no transporte de passageiros, adotou-se o crescimento médio de 4,9% no consumo de combustíveis leves (gasolina e etanol) e de 4,1% nos combustíveis pesados (diesel e biodiesel). Estes números são consistentes com as médias observadas na década passada (2001-2010), de 4,54% para combustíveis leves e 3,6% para combustíveis pesados, calculados com os dados de ANP (2012).

### 5.4.1. Projeções de emissões com etanol

#### 5.4.1.1. Cenário BAU

Para todos os cenários foi fixado o consumo energético dos combustíveis, para cada ano, variando apenas a proporção relativa de biocombustíveis em relação ao total de combustíveis, em função de políticas públicas de apoio e fomento à sua produção e uso e à redução das emissões no ciclo de vida (Figura 29).

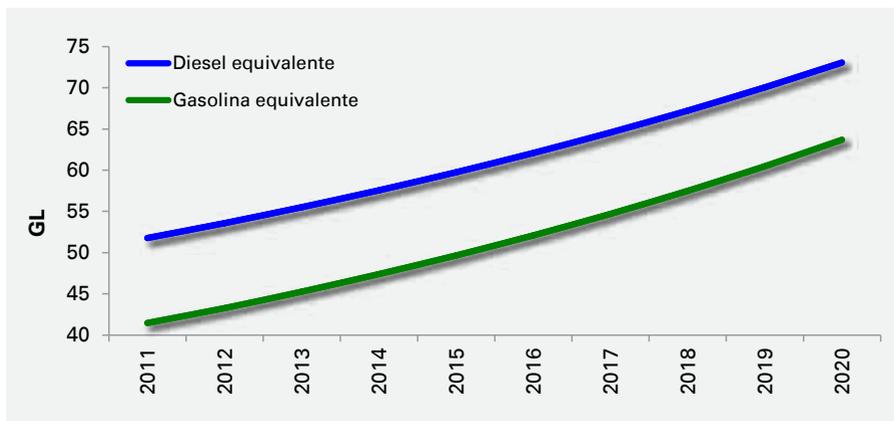


Figura 29. Consumo de combustível no cenário BAU.

As características do cenário BAU (*Business as Usual*) são tendenciais, ou seja, não haveria rupturas paradigmáticas tanto em políticas públicas quanto em inovações tecnológicas. Seriam mantidas inalteradas tanto a mistura de etanol anidro à gasolina (20-25%) quanto de mistura de biodiesel ao diesel (B5). Não haveria outros incentivos, além dos atualmente existentes, à melhoria dos sistemas de produção de culturas energéticas (cana-de-açúcar ou oleaginosas) ou dos processos de produção de biocombustíveis. A infraestrutura de transporte de biocombustíveis seria mantida como atualmente existente.

Este conjunto de premissas indica que, apesar do aumento da demanda de biocombustíveis pelo uso voluntário, tanto no abastecimento de veículos *flex fuel* com etanol, quanto no uso de biodiesel em frotas cativas, os avanços na redução de emissões por litro de biocombustível seria marginal. Para os cálculos, foram mantidas fixas as emissões referentes ao etanol anidro e hidratado, porém foi utilizada uma redução de 5% nas emissões de biodiesel, entre 2012 e 2020, por conta da curva de aprendizado de um biocombustível que ainda é novidade industrial, além de variar a proporção da mistura diesel e biodiesel (Tabela 25).

Tabela 25. Valores percentuais de mistura de biodiesel ao diesel, por cenário.

Ano	BAU		PRO		SUS	
	C*	V	C	V	C	V
2011	5	0,1	5	0,1	5	0,1
2012	5	0,1	5	0,2	5	0,2
2013	5	0,2	6	0,4	6	0,8
2014	5	0,3	7	0,6	7	1,1
2015	5	0,5	7	0,9	8	1,4
2016	5	0,6	8	1,1	9	1,7
2017	5	0,7	8	1,2	10	2
2018	5	0,8	9	1,4	11	2,3
2019	5	0,9	9	1,5	12	2,6
2020	5	1	10	1,7	13	2,9

\* C = Compulsório; V = Voluntário.

As emissões de etanol hidratado, o consumo e as emissões evitadas de gasolina A são apresentadas na Figura 30. Devido às dificuldades conjunturais específicas do curto prazo, foi projetado um pequeno crescimento para 2012 e, a partir de 2013, um crescimento anual de 11%. Na realidade o crescimento ocorre a partir da safra de 2016, pois até 2015 a produção de etanol simplesmente recuperaria os números apresentados na safra 2010.

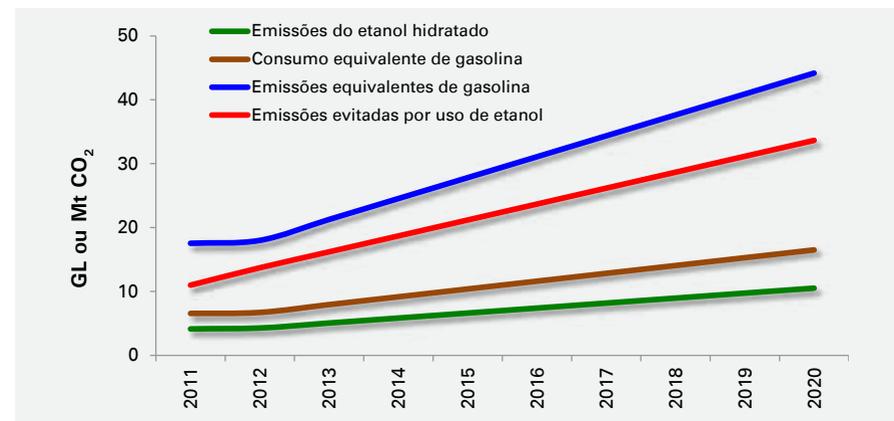


Figura 30. Projeção para emissões do etanol hidratado (BAU).

Para o cálculo das emissões de etanol hidratado, foi mantido o valor fixo de 390 kg CO<sub>2</sub>/L, estimado para 2011, pois o cenário tem como premissa baixos investimentos em inovação tecnológica e no fomento e incentivo à produção e uso de etanol, o que inclui baixo nível de modernização e melhoria do sistema de produção de cana, de elaboração de etanol, além de poucas melhorias na infraestrutura de transporte.

Examinando a Tabela 26, verifica-se que, durante a década 2011-2020, seriam consumidos 181 bilhões de litros de etanol hidratado, que equivaleriam ao consumo de 111 bilhões de litros de gasolina A. No período, ocorreriam emissões de 70 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, devidas ao etanol hidratado, ao tempo em que seriam evitadas 224 milhões de toneladas de emissões, pela substituição da gasolina.

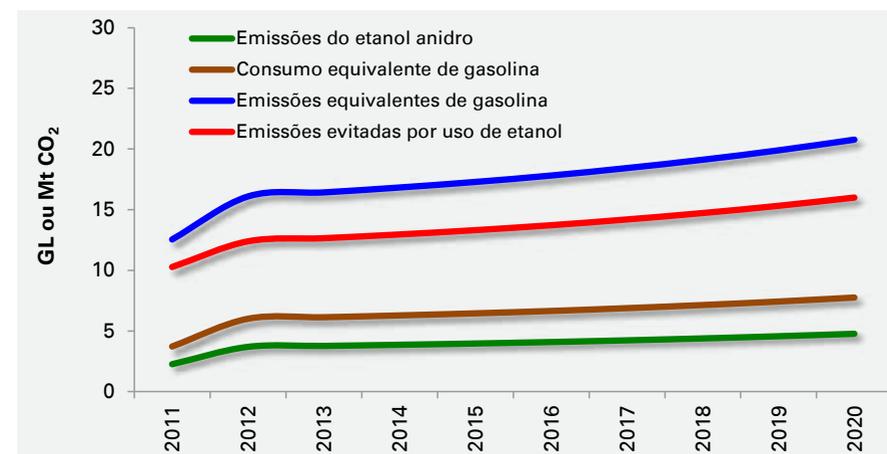
**Tabela 26.** Consumo e emissões evitadas de etanol hidratado (BAU).

Fator	Unidade	Total
Consumo de Etanol hidratado	GL	181,73
Emissões do etanol hidratado	Mt CO <sub>2</sub>	70,87
Consumo equivalente de gasolina A	G L	111,15
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	297,44
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	224,19

O consumo de etanol anidro no cenário BAU, assim como as suas emissões, é apresentado na Figura 31.

Com o crescimento da frota e da quilometragem per capita de cada veículo, e em função da escassez de etanol hidratado, o consumo de gasolina C sofre um incremento desproporcional em 2012, para evitar desabastecimento de combustível. A partir da retomada da oferta de etanol hidratado, a gasolina C apresenta uma curva de crescimento menos acentuada, porém, neste cenário, não retomaria a estabilidade de consumo verificada entre 2000 e 2009 (Figura 20). Para o cálculo das emissões o valor para o etanol anidro foi fixado em 404,8 kg CO<sub>2</sub>/L, vigente em 2011, pelas mesmas razões expostas para o etanol hidratado.

O volume total de etanol anidro consumido no período, para este cenário, seria de 101 bilhões de litros, os quais emitiriam próximo a 40 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, porém evitariam o consumo de 64,5 bilhões de litros de gasolina A, consequentemente poupando emissões de 135 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, decorrentes do não uso de 64 GL de gasolina, substituída pelo etanol anidro (Tabela 27).



**Figura 31.** Projeção para emissões do etanol anidro (BAU).

**Tabela 27.** Consumo e emissões evitadas de etanol anidro (BAU).

Fator	Unidade	Total
Consumo de Etanol anidro	GL	101,13
Emissões do etanol anidro	Mt CO <sub>2</sub>	39,67
Consumo equivalente de gasolina A	GL	64,54
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	175,28
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	135,61

No cenário BAU, o crescimento do uso do biodiesel será marginal e vegetativo durante a década (Figura 32), passando de 5,1 para 6% do total do diesel consumido no Brasil, sendo este incremento devido ao uso voluntário em frotas cativas, em programas privados de redução de emissões.

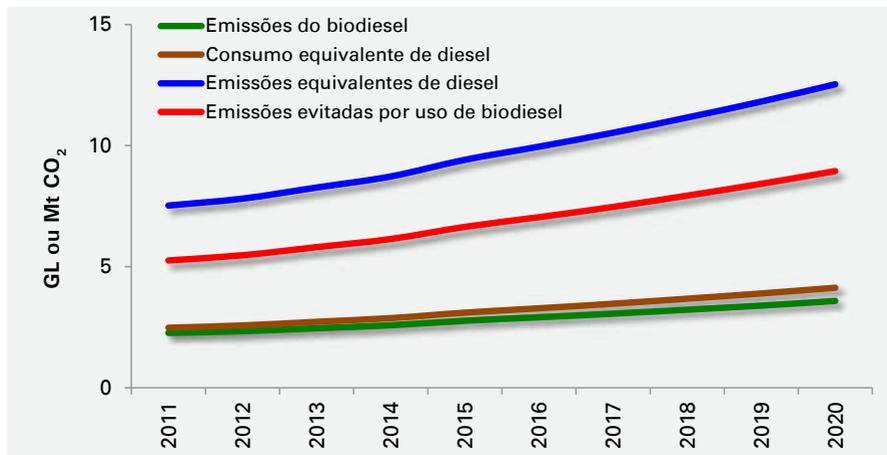


Figura 32. Projeção para emissões do biodiesel (BAU).

O consumo de biodiesel no período seria de 34 bilhões de litros neste cenário, gerando emissões de 28,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, porém evitando o consumo de 32 GL de diesel e a emissão de 69 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (Tabela 28).

Tabela 28. Consumo e emissões evitadas de biodiesel (BAU).

Fator	Unidade	Total
Consumo de biodiesel	GL	34,16
Emissões do biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	28,60
Consumo equivalente de diesel	G L	32,23
Emissões equivalentes de diesel	Mt CO <sub>2</sub>	97,77
Emissões evitadas por uso de biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	69,17

#### 5.4.1.2. Cenário PRO

O cenário PRO (Progresso) avança além das tendências atuais, com mudanças corajosas na política pública do biodiesel, cuja adição ao diesel subiria dos 5% atuais para 10% em 2020, prevendo-se também incentivos à adoção do biodiesel em frotas cativas, equivalentes a 1,5% do diesel consumido no país, em 2020.

Embora mantidas as linhas básicas da política do etanol, o cenário considera um avanço em outros aspectos da política setorial de suporte à produção de cana e de etanol, que aumentam a sua oferta. Igualmente considerou-se o avanço no uso da bioeletricidade obtida da cogeração nas usinas e o aumento da área colhida mecanicamente, bem como o aproveitamento da palhada na geração de energia. Um avanço ponderável no plantio de dendê para aproveitamento energético, com maior rendimento de óleo, maior eficiência energética e menores emissões, também foi considerado.

O cenário postula um aumento nos investimentos de PD&I tanto nas inovações agrônomicas quanto industriais e uma melhoria moderada no sistema de transporte dos biocombustíveis. Em função destas iniciativas governamentais e da resposta da iniciativa privada, considerou-se uma redução das emissões de etanol hidratado de 390 para 330 g CO<sub>2</sub>/L, entre 2012 e 2020, e das emissões de etanol anidro de 405 para 345 g CO<sub>2</sub>/L, conforme a estimativa de Macedo et al. (2008). No caso do biodiesel, as emissões seriam reduzidas de 862 para 768 g CO<sub>2</sub>/L.

Um aumento no consumo de etanol hidratado, que superaria o recorde da década passada já a partir de 2013, é observado na Figura 33, ocupando uma parcela maior do mercado de combustíveis, cujo equivalente energético é considerado fixo para todos os cenários.

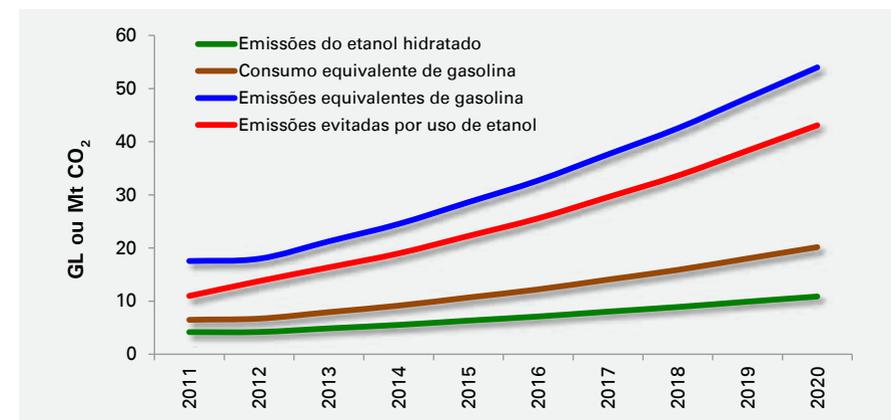


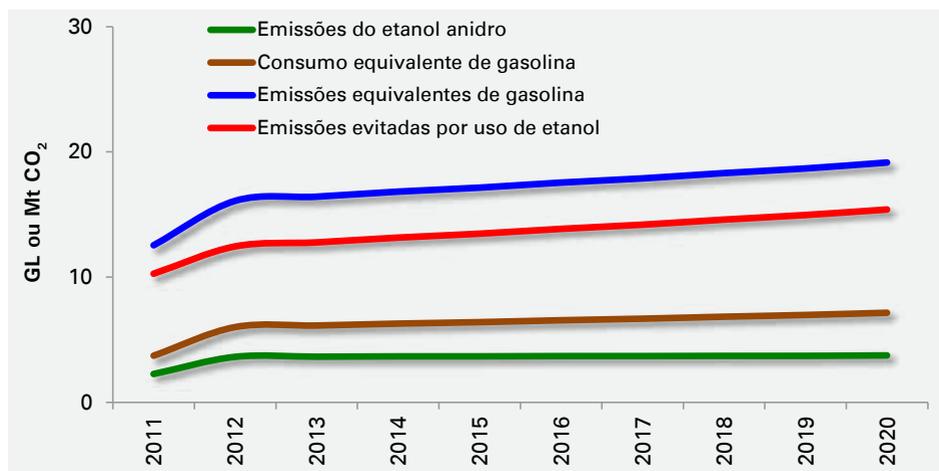
Figura 33. Projeção para emissões do etanol hidratado (PRO).

O consumo de etanol hidratado do período se elevaria de 181 (cenário BAU) para 198 bilhões de litros, ao longo desta década, gerando emissões de 70 Mt de CO<sub>2</sub>. Entretanto, o deslocamento do mercado de gasolina, equivalendo a 121 GL, promoveria um aumento nas emissões evitadas, que poderiam chegar a 255 Mt de CO<sub>2</sub>, conforme exposto na Tabela 29.

**Tabela 29.** Consumo e emissões evitadas de etanol hidratado (PRO).

Fator	Unidade	Total
Consumo de etanol hidratado	GL	198,73
Emissões do etanol hidratado	Mt CO <sub>2</sub>	70,11
Consumo equivalente de gasolina A	G L	121,55
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	325,26
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	255,15

Nesta condição, com o mercado de gasolina crescendo em taxas menos aceleradas que no cenário BAU, seriam consumidas 4 GL a menos de etanol anidro, que, de toda a maneira, seriam utilizados na forma de etanol hidratado (Figura 34).



**Figura 34.** Projeção para emissões do etanol anidro (PRO).

Conforme pode ser observado na Tabela 30, no cenário PRO o etanol anidro substituiria mais de 62 GL de gasolina A, que seriam responsáveis por 170 Mt de emissões, resultando em emissões evitadas de 135 Mt de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 30.** Consumo e emissões evitadas de etanol anidro (PRO).

Fator	Unidade	Total
Consumo de Etanol anidro	GL	98,52
Emissões do etanol anidro	Mt CO <sub>2</sub>	35,49
Consumo equivalente de gasolina A	G L	62,82
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	170,69
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	135,19

Com relação ao biodiesel, o avanço da política pública de mistura ao diesel provoca um efeito “tobogã” na curva de consumo ao longo da década, devido ao incremento no percentual da mistura, ajustado para ocorrer a cada ano, até atingir 10% em 2020 (Figura 35). O incentivo das políticas públicas setoriais provoca um aumento no consumo de biodiesel neste cenário, com um incremento de 18 GL em relação ao cenário BAU, no somatório da década (Tabela 31).

**Tabela 31.** Consumo e emissões evitadas de biodiesel (PRO).

Fator	Unidade	Total
Consumo de biodiesel	GL	52,45
Emissões do biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	42,17
Consumo equivalente de diesel	G L	49,48
Emissões equivalentes de diesel	Mt CO <sub>2</sub>	150,13
Emissões evitadas por uso de biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	107,96

Desta forma, seria evitado o uso de 49 GL de diesel, volume que seria responsável pela emissão de 150 Mt de CO<sub>2</sub>. Desta forma, o biodiesel permitira evitar 108 Mt de emissões de CO<sub>2</sub>, durante esta década, no cenário PRO.

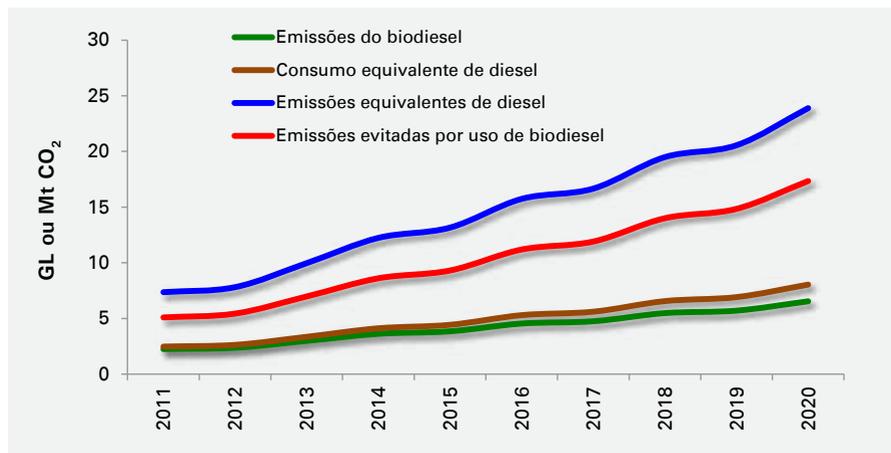


Figura 35. Projeção para emissões do biodiesel (PRO).

#### 5.4.1.3. Cenário SUS

Este é o cenário mais otimista, em que as iniciativas governamentais, as ações privadas e a resposta da cidadania e dos consumidores teriam como foco a sustentabilidade, assim medida pela maximização da redução das emissões veiculares, associadas a uma melhoria tecnológica em toda a cadeia (tecnologia agrônômica, industrial, novos biocombustíveis), através da geração e transferência de inovações no estado da arte mundial. Diversas políticas de incentivo ao aumento da produção de matéria prima, em especial de cana-de-açúcar e dendê, e à expansão da geração e ao consumo voluntário de bioeletricidade e bioprodutos (HARNISCH e SCHRÖEDER, 2010), gerariam solidez nas cadeias produtivas. Os modais de transporte seriam modernizados, com especial atenção para os dutos e políticas específicas de apoio à exportação de biocombustíveis, o que conferiria ainda mais solidez ao setor. O ingresso de novas tecnologias, como os veículos movidos a células de combustível, representa uma oportunidade de sinergia e agregação de valor com o segmento de biocombustíveis (MOEHLENBROCK et al., 2010; FRANKS e NEVIN, 2010; FRANKS et al., 2010; HALLENBECK, 2011), sendo é previsto neste cenário.

Nesta condição o Brasil assumiria a liderança mundial na produção e uso de biocombustíveis, tornando-se um *case* a ser emulado por outras

nações, no tocante à sustentabilidade do desenvolvimento econômico e um exemplo agressivo de redução das emissões de GEE.

Cumpridas as premissas do cenário, as emissões do etanol hidratado até o final da década seriam reduzidas de 390 para 300 g CO<sub>2</sub> / L e do etanol anidro de 405 para 310 g CO<sub>2</sub> / L. A redução seria obtida pela melhora da tecnologia agrônômica, com elevação da produtividade sustentável, eliminação da queima de palhada, geração de biogás de vinhaça, gaseificação e geração de bioeletricidade do bagaço, produção de outros biocombustíveis de cana, como farneseno e butanol, entre outros avanços.

A melhoria dos índices zootécnicos, de nutrição e de sanidade do rebanho bovino e de frangos do país aumentaria a oferta de sebo, assim como o forte incentivo à produção de óleo de palma (dendê), acompanhado de outras inovações tecnológicas como os avanços na produtividade sustentável de soja, ganhos de escala industrial, melhoria da infraestrutura de transporte, que são premissas do cenário, reduziriam as emissões do biodiesel de 862 para 668 g CO<sub>2</sub>.

O forte aumento do consumo de etanol hidratado é uma das marcas principais do cenário SUS, que, em termos de equivalente energético, significaria um *market share* de 54% do mercado de combustíveis para automóveis e utilitários leves. Este aumento significaria um volume acentuado de emissões evitadas, conforme demonstra a Figura 36.

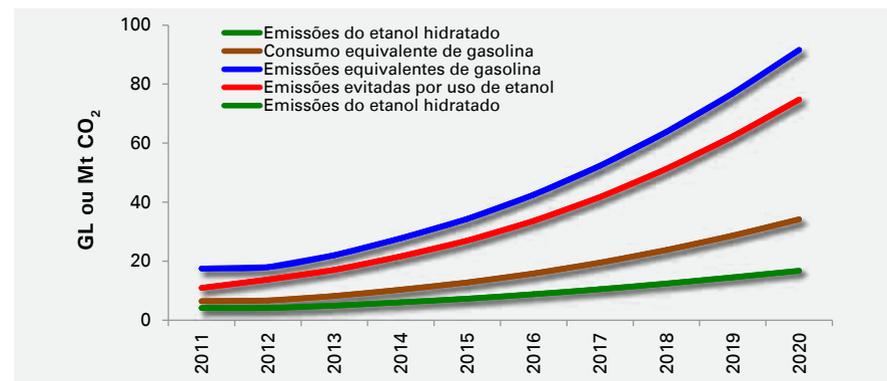
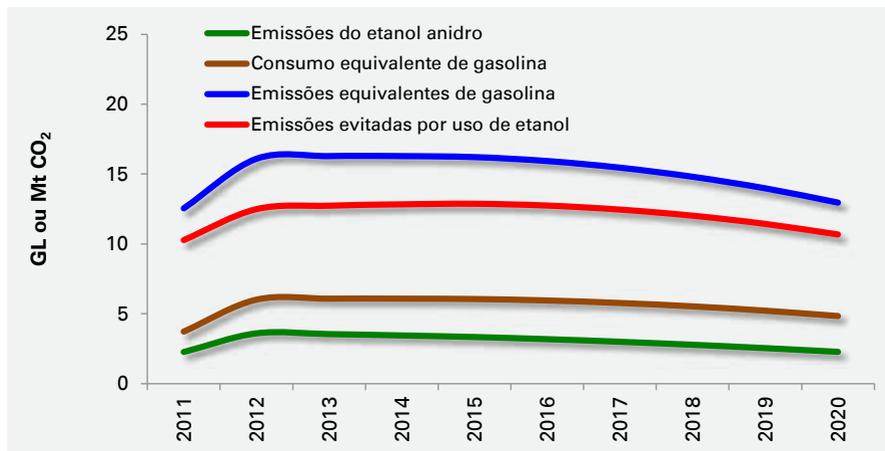


Figura 36. Projeção para emissões do etanol hidratado (SUS).

Neste cenário, seriam consumidos 273 GL de etanol hidratado (Tabela 32) que, ao preço ao consumidor vigente em março de 2012, representariam R\$ 464 bilhões, que equivaleriam a 12% do PIB do Brasil, previsto para 2012. A substituição de gasolina por etanol hidratado evitaria a emissão de 354 Mt de CO<sub>2</sub>, ao longo da década. Como corolário da maior participação do etanol hidratado no mercado de combustíveis, há uma redução de 8 GL no uso de etanol anidro misturado à gasolina A (Figura 37).

**Tabela 32.** Consumo e emissões evitadas de etanol hidratado (SUS).

Fator	Unidade	Total
Consumo de etanol hidratado	GL	273,23
Emissões do etanol hidratado	Mt CO <sub>2</sub>	90,08
Consumo equivalente de gasolina A	G L	167,12
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	447,20
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	354,74



**Figura 37.** Projeção para emissões do etanol anidro (SUS).

A Tabela 33 mostra uma substituição de 55 GL de gasolina A por etanol anidro, redundando em emissões evitadas de 120 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 33.** Consumo e emissões evitadas de etanol anidro (SUS).

Fator	Unidade	Total
Consumo de Etanol anidro	GL	87,12
Emissões do etanol anidro	Mt CO <sub>2</sub>	30,02
Consumo equivalente de gasolina A	G L	55,32
Emissões equivalentes de gasolina A	Mt CO <sub>2</sub>	150,61
Emissões evitadas por uso de etanol	Mt CO <sub>2</sub>	120,59

No cenário SUS, devido ao forte incentivo ao seu uso, o consumo de biodiesel cresce de forma exponencial ao longo da década, passando de 2,6 para 11,3 GL/ano entre 2011 e 2020. No final da década, além da mistura compulsória de B10, estima-se que o mercado voluntário de biodiesel representaria mais 5,9% do mercado total de diesel do país (Figura 38).

As emissões evitadas pelo uso de biodiesel, tanto por mandato quanto voluntário, alçariam a 136 Mt CO<sub>2</sub>, devido à substituição de 60 GL de diesel, no período compreendido entre 2011 e 2020 (Tabela 34). O forte aumento das emissões evitadas neste cenário não se cinge apenas ao aumento do volume de biodiesel consumido, porém reflete os investimentos em PD&I, com a modernização da cadeia produtiva e a mudança na composição do mix de matéria prima.

**Tabela 34.** Consumo e emissões evitadas de biodiesel (SUS).

Fator	Unidade	Total
Consumo de biodiesel	GL	64,04
Emissões do biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	47,26
Consumo equivalente de diesel	G L	60,42
Emissões equivalentes de diesel	Mt CO <sub>2</sub>	183,30
Emissões evitadas por uso de biodiesel	Mt CO <sub>2</sub>	136,04

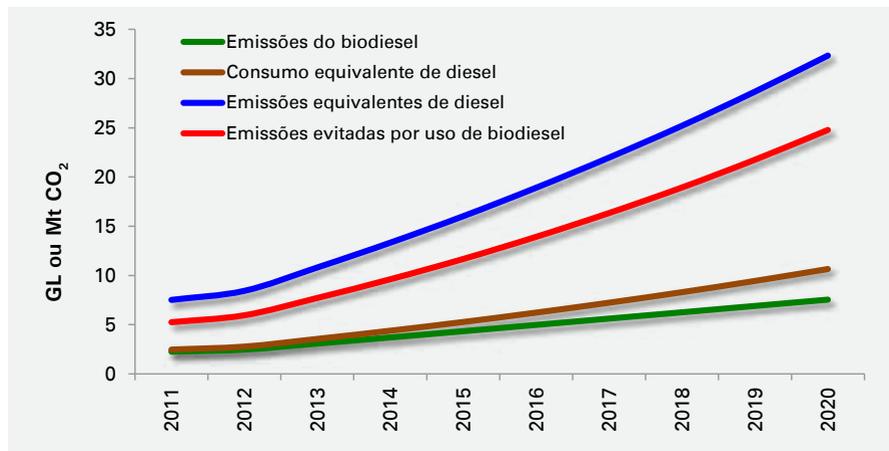


Figura 38. Projeção para emissões do biodiesel (SUS).

## 6. Considerações finais e conclusões

Após os cientistas do IPCC estabelecerem umnexo científico acima de qualquer dúvida razoável entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE), o acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera e as mudanças climáticas globais, diversos esforços vem sendo empreendidos para redução das emissões e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a economia, mormente sobre a agricultura.

As fontes fósseis de energia são consideradas, individualmente, a maior fonte emissora de GEE. A maior parcela de utilização das fontes fósseis, especialmente petróleo e gás natural, ocorre no setor de transportes. Apenas no ano de 2010 foram efetuados investimentos da ordem de US\$211 bilhões no setor de energia renovável (REN21, 2011), objetivando substituir fontes fósseis de energia, tendo como meta a redução das emissões dos setores de energia e de transporte.

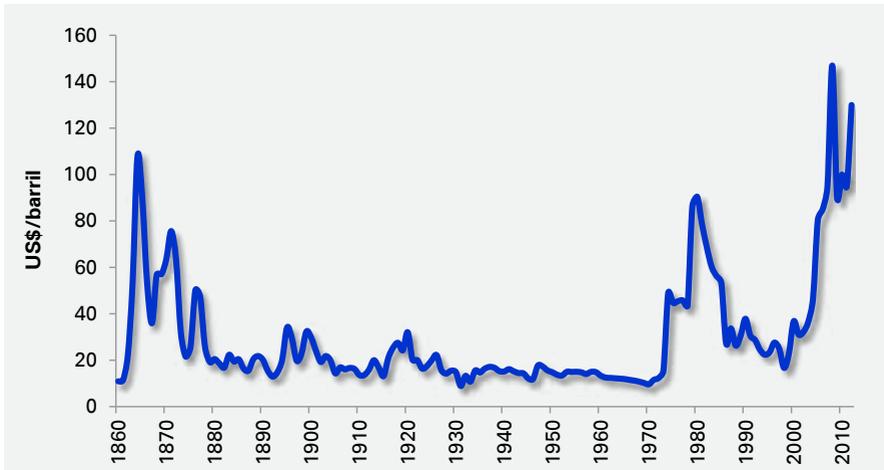
Cada país busca otimizar as suas vantagens competitivas ao aplicar os investimentos e, no caso do Brasil, a produção de biocombustíveis tanto para uso doméstico quanto para exportações apresenta condi-

ções de competitividade ímpares nas condições atuais e na perspectiva do médio e longo prazo. Outros países, sem estas vantagens comparativas, necessitam investir em outras áreas, como a captura e estocagem do carbono (BOUVART et al., 2011), ou utilizar parte da área de alimentos para produção de energia, com sérias implicações no balanço de energia (SEARCHINGER et al., 2008).

O uso extensivo de biocombustíveis no Brasil iniciou com o Proálcool, na década de 70. Duas políticas foram então implementadas, sendo uma a mistura compulsória de etanol anidro à gasolina e outra o incentivo à produção e uso de veículos a etanol. Após um acelerado impulso inicial durante as décadas de 1970 e 1980 do século passado, os veículos movidos exclusivamente a etanol perderam espaço de mercado (Figura 20). O etanol retornou à condição de protagonista de mercado na primeira década do século XXI, com o surgimento dos veículos *flex fuel*, fabricados a partir de 2003.

Diversos motivos explicam a regressão mercadológica dos veículos a etanol, entretanto a queda acentuada dos preços do petróleo, após dois choques de preços (que foram o mote da criação do Proálcool) exerceram papel fundamental. A Figura 39 apresenta a cotação do petróleo Brent na New York Stock Exchange (NYSE), em valores corrigidos para 2011, que explicita a queda da cotação do petróleo entre 1986 e 2000.

O comportamento recente do preço do petróleo, na primeira década deste século, mostra uma retomada firme da elevação de preços. Mesmo abstraindo o interregno especulatório que antecedeu a crise financeira de 2008, a Figura 34 mostra elevação constante do seu preço. O que é uma ameaça às economias dependentes de combustíveis fósseis, representa uma enorme oportunidade para economias com matriz energética mais sustentável e com condições competitivas favoráveis para operar na produção e uso de energia renovável, como é o caso do Brasil. Este é um mote ímpar para implementação de políticas públicas ambiciosas, de incentivo ao uso de energia renovável no Brasil.



**Figura 39.** Cotações do barril do petróleo (US\$ de 2011)  
Fonte: BP, 2010.

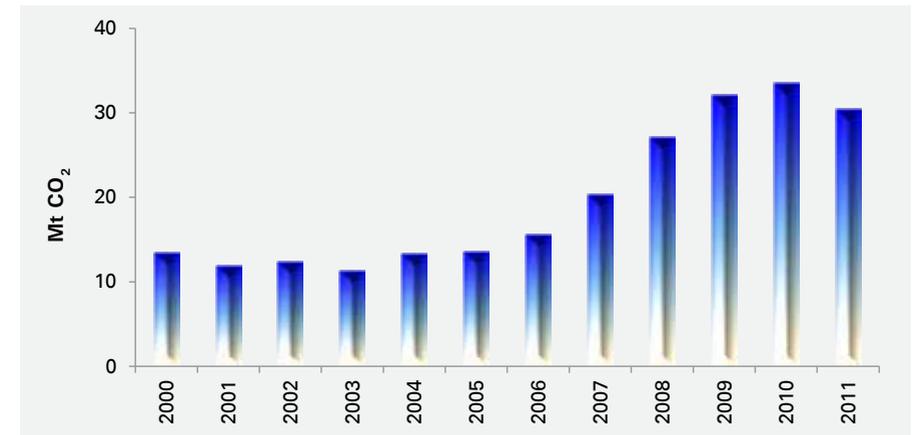
Durante o período de 2000 a 2011, o uso de etanol hidratado (voluntário) e anidro (mandatário) e de biodiesel (predominantemente mandatário, marginalmente voluntário) permitiu ao Brasil evitar emissões equivalentes a 310 Mt CO<sub>2</sub>, as quais ocorreriam caso não houvesse o uso de biocombustíveis (Figura 40).

Verifica-se que, no ano de 2010, houve um abrandamento da tendência de reduções de emissões, em alta acentuada desde 2007, seguida de um recuo na redução, no ano de 2011. Este é o reflexo do menor consumo de etanol hidratado, conforme comentado anteriormente.

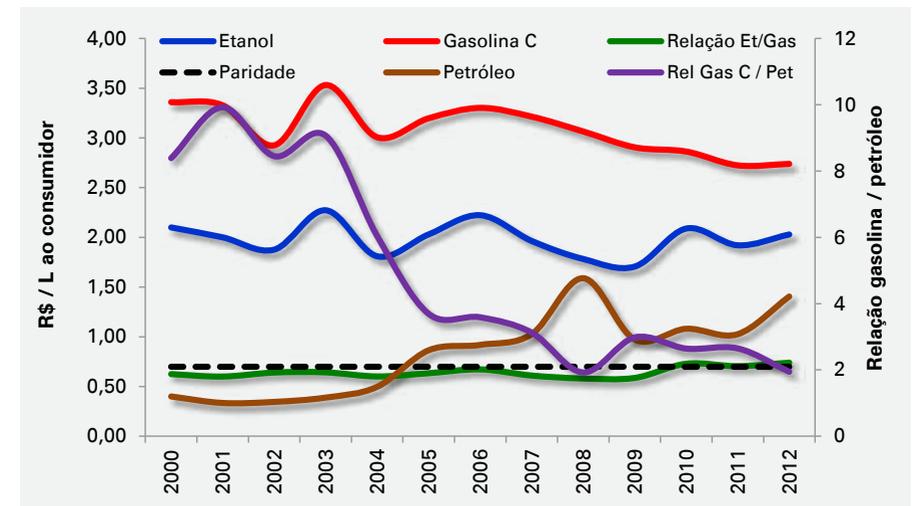
A Figura 41 apresenta os preços ao consumidor de gasolina C e etanol hidratado, coletados pela ANP e ajustados pelo IPCA para janeiro de 2012, e as relações entre o preço da gasolina, do etanol e do petróleo.

Três fatos são verificáveis pelo exame da Figura 41. O primeiro deles demonstra que o preço da gasolina C ao consumidor, no Brasil, manteve relativa paridade com o preço internacional do petróleo, entre 2000 e 2003. Em janeiro de 2003 um litro de gasolina comprava 9,07 litros de petróleo, pela cotação da NYSE para o petróleo Brent. Este fator

foi corroído ao longo do tempo e, em janeiro de 2012 com o valor equivalente a um litro de gasolina C vendida ao consumidor no Brasil é possível adquirir apenas 1,95 litros de petróleo.



**Figura 40.** Emissões evitadas por uso de biocombustíveis no Brasil.



**Figura 41.** Preços ao consumidor de etanol hidratado e gasolina C.  
Fonte: Calculado a partir de ANP, 2012; BP, 2010 e HC, 2012.

As razões que levaram o governo brasileiro, acionista maior e detentor do comando executivo da Petrobras, a manter o preço da gasolina

descendente entre 2003 e 2012 não vem ao caso para esta análise<sup>8</sup>. Entretanto, para os efeitos de uma política de substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis este fato pode ser desastroso, pois implica um desestímulo muito forte tanto à produção quanto ao consumo, posto que o Governo, ou a sua operadora de mercado (Petrobras) absorvem grande parcela do preço da matéria prima.

O segundo fato mostra que, apesar de não haver qualquer política pública ou garantia de paridade de preços entre a gasolina e o etanol, a relação entre o preço dos dois combustíveis se manteve sempre próximo à paridade, por razões estritamente de mercado, posto que a formação de preço do etanol não se condiciona ao exposto acima para a gasolina. Quando o preço tendeu a subir além da paridade, o consumidor migrou para a gasolina, forçando a queda do preço, o mesmo ocorrendo quando o preço caiu abaixo da paridade, o que levou ao aumento do consumo sem oferta correspondente, elevando os preços e nivelando-os pela paridade, que significa a neutralidade da escolha meramente por fatores financeiros.

O terceiro fato deriva do exposto acima e mostra que, em uma condição de neutralidade de preços, em que é indiferente a aquisição de etanol ou gasolina, o consumidor prefere um produto que tenha uma externalidade ambiental positiva, como é o caso do etanol. Pacini e Silveira (2010) acentuam que a estabilidade de preços é um fator que fideliza os consumidores para o uso de biocombustíveis.

As perspectivas futuras para o setor são animadoras e dependem essencialmente dos cenários de atuação do Governo Federal, através de políticas públicas que incentivem a inovação tecnológica, a expansão da produção e do uso de biocombustíveis e outras formas de energia renovável, como bioeletricidade. Este estudo contemplou três cenários. No cenário tendencial (*Business as Usual* – BAU), em que o Governo não incentivará a geração de inovações e a sua

<sup>8</sup> Em janeiro de 2012, em valores atualizados, o preço real (atualizado pelo IPCA) de um litro de gasolina vendida ao consumidor no Brasil teve uma redução de 22,5% sobre o preço praticado em janeiro de 2003. No período, a cotação internacional do barril do petróleo aumentou cerca de 260%.

transferência além do esforço atual, bem como não avançará nas políticas públicas de produção e uso de biocombustíveis, haveria emissões evitadas de 546 Mt de CO<sub>2</sub>, entre 2011 e 2020.

Para o cenário Progresso (PRO), em que o Governo incentivaria moderadamente a geração e adoção de inovações tecnológicas ao longo da cadeia, bem como implementaria medidas de apoio à produção e uso de biocombustíveis, incluindo a expansão do mandato de uso de biodiesel, as emissões evitadas alcançariam 615 Mt de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, no cenário Sustentável (SUS), em que o Governo interviria fortemente para fortalecer a geração e adoção de inovações tecnológicas, promoveria com agressividade a produção de matérias primas e sua conversão em biocombustíveis, incluindo aqueles de segunda geração, ampliaria o mandato de mistura de biodiesel, e melhoraria a infraestrutura de transporte de biocombustíveis, além de atuar agressivamente para promover as exportações, as emissões evitadas atingiriam 756 Mt de CO<sub>2</sub>. A Figura 42 ilustra a explanação dos ganhos ambientais com a redução de emissões por uso de biocombustíveis

Para atender a demanda prevista de biocombustíveis, é necessário produzir a matéria prima respectiva. Em 2009, a produção brasileira de cana atingiu o pico de 690 Mt, que se reduziu em 2010 e 2011, quando atingiu 533 Mt, devido a uma série de problemas climáticos e de política agrícola e industrial. Superados estes problemas de baixa produtividade, a série histórica deve retomar o ciclo ascendente, a partir dos resultados já obtidos em 2009. Naquele ano, a produtividade média da cana, considerando um ciclo de 5 anos, foi de 85 t/ha e a produtividade de etanol de 82 L/t. Entre 1970 e 2009, a produtividade de cana cresceu à média geométrica de 3,1% a.a. e a produtividade de etanol por tonelada de cana cresceu 2,7% a.a, de acordo com BRASIL (2011).

A Figura 43 expõe, para cada cenário, a demanda de área cana-de-açúcar prevista para produção de etanol (anidro ou hidratado) durante a década, na ausência de imprevistos climáticos ou de percalços de políticas públicas. Foi considerado um incremento médio na produtividade agrônômica e industrial ao longo da década. Para o cenário BAU, e para o ano de 2012 em todos os cenários, foi considerada a mesma taxa de crescimento da produtividade das décadas passadas; para o cenário PRO considerou-se um crescimento de 5% sobre as taxas anteriores e para o cenário SUS um crescimento de 15% sobre as taxas consideradas para o cenário BAU, ambas aplicadas a partir do ano de 2013. A produtividade e a densidade energética são grandes indutores da redução de emissões de sistemas agrícolas, como explicitado em Tuomisto et al. (2012).

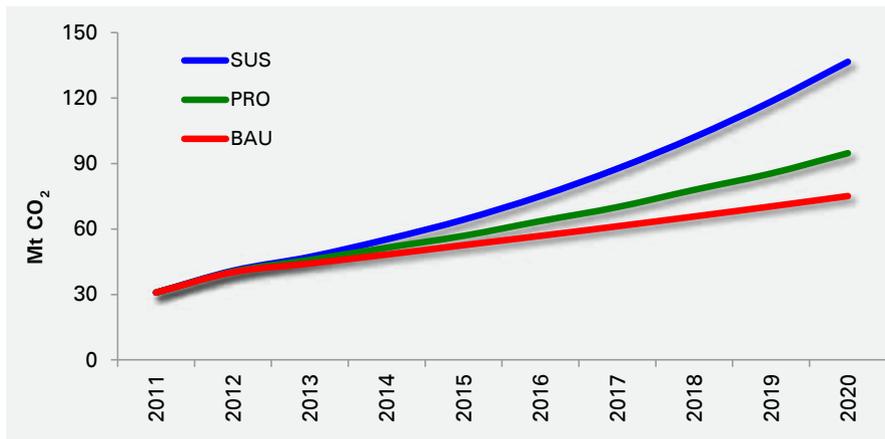


Figura 42. Emissões evitadas com o uso de biocombustíveis, em três diferentes cenários.

Mesmo no cenário SUS, de maior demanda, a área de cana adicional destinada à produção de etanol atingiria um máximo de 2,8 Mha, o que é um valor absolutamente razoável para o Brasil. Entretanto, esta área poderia ser diminuída em 15-20%, pelo uso do sorgo sacarino na renovação do canavial, o qual seria utilizado para produção de etanol (BELLEMER et al., 2010; XIN e WANG, 2011), ou pelo aproveitamento do bagaço e da palhada da cana para produzir etanol de segunda geração (KAMBAM e HANSON, 2011).

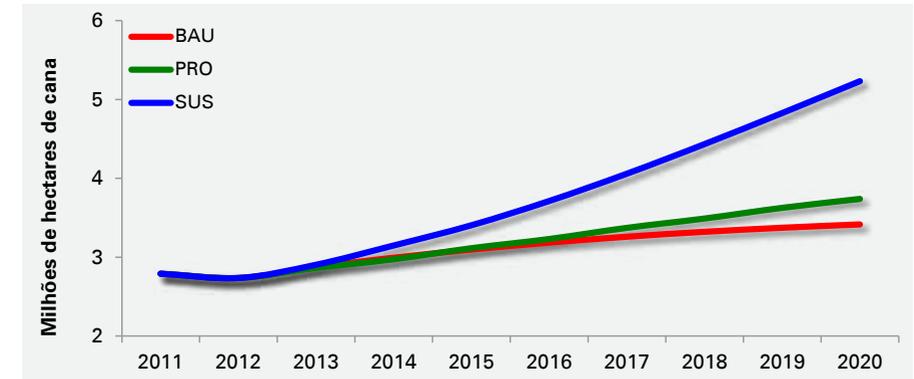


Figura 43. Demanda de área de cana para produção de etanol.

No caso do biodiesel, a importância das políticas públicas de suporte, ao menos ao longo da presente década, serão essenciais, devido ao custo mais alto dos óleos vegetais em relação ao petróleo, que é o precursor do óleo diesel. A previsão é de que, ao longo desta década, a cotação do petróleo suba com maior intensidade que os óleos vegetais, porém não a ponto de aproximar as cotações, como ocorreu com o óleo de dendê e o petróleo em 2000 e 2005. Portanto, competirá à política pública equalizar o diferencial de preços, em favor da maior sustentabilidade do sistema de transporte.

A Tabela 35 estima as demandas de óleo vegetal e gordura animal para produção de biodiesel, em função do cenário. O uso de óleo de dendê, de melhor balanço de energia e maior densidade energética por unidade de área, aumenta do cenário BAU para o PRO e é mais intenso no SUS, como também ocorre com a gordura animal.

No cenário SUS, aquele em que ocorre a maior demanda de biodiesel, o volume de óleo de soja e outros óleos vegetais, excetuado o dendê, é estimado em 7,12t. Supondo o uso exclusivo de soja, e também supondo que o percentual de óleo da semente de soja permaneça estável em 19%, no ano de 2020 seriam necessários 37 Mt de soja para produzir o óleo necessário. Neste ano, as estimativas apontam para uma produção de soja no Brasil superior a 100 Mt, em função da forte

demanda global por proteínas. Portanto, a oferta de soja brasileira seria suficiente para atender a demanda por óleo vegetal para produção de biodiesel, até o final da década.

O restante da demanda de matéria prima para biodiesel seria atendido pelo aumento da oferta de gordura animal, em especial sebo bovino e gordura de frango, e o aumento da oferta de óleo de dendê, como resposta à política pública de incentivo a esta cultura, já lançada pelo Governo Federal. De qualquer maneira, é importante atentar para as relações de preços entre matérias primas para o biodiesel, e sua comparação com o petróleo, como indicado na Figura 44.

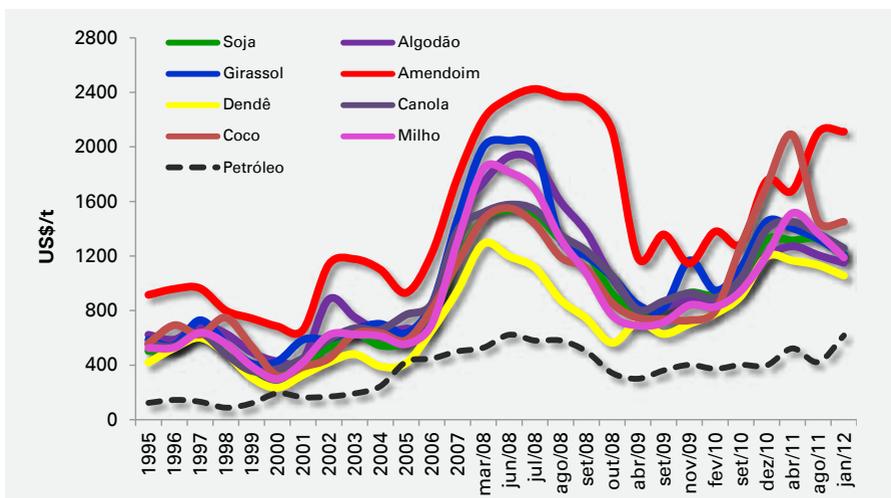


Figura 44. Cotação dos principais óleos vegetais.

Fonte: USDA, 2012.

Em um cenário de alta sustentabilidade, em que políticas de PD&I seriam fortemente favorecidas, não se pode descartar fatos auspiciosos como o aumento constante da produtividade da soja, diminuindo a demanda de área; a expansão da cultura do algodão, com maior oferta de óleo; o uso mais intenso de girassol ou de canola, como preconizado por Zhang e Malhi (2010) ou mesmo tecnologias no estado da arte, como o cultivo de algas para produção de biodiesel (TANG et al., 2010; HANNON et al., 2010).

Tecnologias estão sendo revisitadas e modernizadas, como o uso da pirólise de biomassa para a obtenção de biocombustíveis, incluindo biodiesel (de WILD et al., 2011); da gaseificação para obtenção de gás de síntese (SLIVKA et al., 2011) e do uso da tecnologia de Fischer-Tropsch para síntese de diesel sintético a partir de CO e H<sub>2</sub> (DESHMUKH et al., 2011; STREET e YU, 2011); bem como métodos inovativos utilizando engenharia genética e biologia molecular começam a fluir dos laboratórios para os protótipos e instalações pré-industriais, devendo alcançar o mercado até o final desta década (MADSEN et al., 2011; VINUSELVI et al., 2011).

Tabela 35. Demanda de óleo vegetal e sebo para produção de biodiesel.

Ano	BAU			PRO			SUS		
	Soja*	Sebo	Dendê	Soja	Sebo	Dendê	Soja	Sebo	Dendê
	GL	Mt	GL	GL	Mt	GL	GL	Mt	GL
2011	2,18	0,39	0,00	2,18	0,39	0,00	2,18	0,39	0,00
2012	2,27	0,40	0,00	2,32	0,41	0,00	2,45	0,44	0,00
2013	2,40	0,43	0,00	2,88	0,56	0,04	3,02	0,59	0,08
2014	2,50	0,48	0,00	3,50	0,68	0,09	3,63	0,77	0,14
2015	2,70	0,51	0,00	3,71	0,78	0,09	4,20	0,97	0,28
2016	2,82	0,54	0,03	4,38	0,93	0,17	4,83	1,15	0,46
2017	2,94	0,61	0,04	4,52	1,03	0,24	5,38	1,40	0,69
2018	3,08	0,64	0,08	5,22	1,21	0,35	5,99	1,61	0,97
2019	3,18	0,72	0,12	5,36	1,34	0,44	6,51	1,92	1,30
2020	3,33	0,76	0,18	6,06	1,56	0,68	7,12	2,16	1,70

\* O óleo de soja inclui outros óleos vegetais de menor expressão (algodão, girassol, canola, mamona, etc.); o sebo inclui sebo bovino e outras gorduras animais.

Um cenário ousado e ambicioso, do ponto de vista da sustentabilidade e do apoio à PD&I na área de energia renovável, pode descortinar novas fronteiras, como o aproveitamento de resíduos ou mesmo da produção de biomassa florestal (SHEPHERD et al., 2011) tanto para a produção de bioeletricidade quanto para obtenção de biocombustíveis de segunda geração.

Em conclusão, pela análise dos resultados obtidos por este estudo, o volume de emissões evitadas com o uso de biocombustíveis é função direta de políticas públicas e do apoio que venha a ser concedido a

quatro grandes segmentos da cadeia: a) Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica; b) Produção de matéria prima em bases sustentáveis; c) Produção e uso de biocombustíveis; e d) Modernização e otimização da infraestrutura de transporte, para redução das emissões na fase de transporte de biocombustíveis.

## Referências

ADLER, P.R.; DEL GROSSO, S. J.; PARTON, W. J. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. **Ecological Applications**, v.17, p.675–691, 2007.

ANDRADE, A. L. C.; MATTEI, L. Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>: uma análise do setor de transportes brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 39., 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANPEC, 2011. Disponível em: <<http://anpec.org.br/encontro/2011/inscricao/arquivos/000-0689fab84eda1fddba-bd84c5d5704cec.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

ANFAVEA. Associação Nacional de Fabricantes de Veículos. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. 2011. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Dados estatísticos**. 2012. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=59236&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebu st=1329830785537>>. Acesso em: 21 fev. 2012.

BEEHARRY, R.P. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. **Biomass & Bioenergy**, v.20, p.361–370, 2001.

BELLMER, D.; HUHNKE, R.; WHITELEY, R.; GODSEY, C. The untapped potential of sweet sorghum as a bioenergy feedstock. **Biofuels**, v.1, n.4, p.563-573, 2010.

BIGIO, A.G. Clean air initiative in latin american cities. **World Bank**

**Progress Report**, 2001. p.32-33. Disponível em: <<http://www.imf.org/external/np/mae/fslc/092701.htm>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

BOUVART, F.; COUSSY, P.; HENG, J.; MICHEL, P.; MÉNARD, Y. Environmental assessment of carbon capture and storage deployment scenarios in France. **Energy Procedia**, v.4, p.2518–2525, 2011.

BP. British Petroleum. **BP energy outlook 2030**. 2012. Disponível em: <<http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

BP. British Petroleum. **BP statistical review of world energy: June 2010**. 2010. Disponível em: <[http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2008/STAGING/local\\_assets/2010\\_downloads/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2010.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf)>. Acesso em: 29 fev. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico da Agroenergia 2010**. 2011. Disponível em: <[http://www.njobs.com.br/clientes/MAPA/anuario/entregaPT/Book\\_Anuario\\_Portugues\\_22\\_03\\_2011.pdf](http://www.njobs.com.br/clientes/MAPA/anuario/entregaPT/Book_Anuario_Portugues_22_03_2011.pdf)>. Acesso em: 29 fev. 2012.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. 2009. Disponível em: <<http://pagina22.com.br/wp-content/uploads/2009/11/inventario1.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **1º inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. 2011. Disponível em: <[http://www.cntdespoluir.org.br/Downloads/Inventario\\_22\\_03.pdf](http://www.cntdespoluir.org.br/Downloads/Inventario_22_03.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2012.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário de emissões de CO<sub>2</sub>**. 2012. Disponível em: <[http://www.fiepr.org.br/fiepr/conselhos/meio\\_ambiente/uploadAddress/](http://www.fiepr.org.br/fiepr/conselhos/meio_ambiente/uploadAddress/)>

INVENT%20DE%20EMISS%20CO2%20-%20CETESB%5B48877%5D.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2012.

CLEVELAND, C.; KUBISZEWSKI, I. United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, Brazil. 2007. Disponível em: <[http://www.eoearth.org/article/United\\_Nations\\_Conference\\_on\\_Environment\\_and\\_Development\\_%28UNCED%29,\\_Rio\\_de\\_Janeiro,\\_Brazil](http://www.eoearth.org/article/United_Nations_Conference_on_Environment_and_Development_%28UNCED%29,_Rio_de_Janeiro,_Brazil)>. Acesso em 29 ago. 2012.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. 2011. Disponível em: <[http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20mai\\_2011.pdf](http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20mai_2011.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2012.

COLLEGE OF THE DESERT. **Fuel cell technologies**. 2001. Disponível em: <[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm00r0.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm00r0.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2012.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries Históricas: Brasil por produtos**. 2012. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=>>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

DAVIS, S. C.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DELUCIA, E. H. Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. **Trends in Plant Science**, v.14, n.3, p.140-146, 2012.

DE WILD, P.; REITH, H.; HEERES, E. Biomass pyrolysis for chemicals. **Biofuels**, v.2, n.2, p.185-208, 2011.

DELUCCHI, M.A. **Lifecycle analyses of biofuels**. Davis: Institute of Transportation Studies, University of California, 2006. Disponível em: <<http://www.its.ucdavis.edu/publications/2006/UCD-ITS-RR-06-08.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

DESHMUKH, S. R.; TONKOVICH, A. L. Y.; MCDANIEL, J. S.; SCHRADER, L. D.; BURTON, C. D.; JAROSCH, K. T.; SIMPSON, A. M.; KILANOWSKI, D. R.; LEVINESS, S. Enabling cellulosic diesel with microchannel technology. **Biofuels**, v.2, n.3, p.315-324, 2011.

EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Ed.) **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, 2005. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. 2011. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados\\_Pre\\_BEN\\_2011.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2011.pdf)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Cadernos de Energia: Perspectivas para o etanol no Brasil**. 2008. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos\\_28/Cadernos%20de%20Energia%20-%20Perspectiva%20para%20o%20etanol%20no%20Brasil.pdf](http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28/Cadernos%20de%20Energia%20-%20Perspectiva%20para%20o%20etanol%20no%20Brasil.pdf)>. Acesso em: 21 fev. 2012.

ESPARTA, A. R. J.; MOREIRA, J. R. **Redução de emissões de gases de efeito estufa na substituição de MTBE e gasolina com etanol – estudo de caso: etanol do Brasil como aditivo à gasolina no Canadá**. 2004. Disponível em: <<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CBPE2004/Artigos/REDU%20CO2%20DE%20EMISS%20D5ES%20DE%20GASES%20DE%20EFEITO%20ESTUFA%20NA%20SUBSTITUI%20C7.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

EU. European Union. **EU energy and transport in figures**. 2011. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/energy/publications/statistics/doc/2010\\_energy\\_transport\\_figures.pdf](http://ec.europa.eu/energy/publications/statistics/doc/2010_energy_transport_figures.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2012.

FARRELL, A. E.; PLEVIN, R. J.; TURNER, B. T.; JONES, A. D.;

O'HARE, M.; KAMMEN, D. M. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. **Science**, v.311, n.5760, p.506-508, 2006.

FRANKS, A. E.; MALVANKAR, N.; NEVIN, K. P. Bacterial biofilms: the powerhouse of a microbial fuel cell. *Biofuels*, v.1, n.4, p.589-604, 2010.

FRANKS, A. E.; NEVIN, K. P. Microbial fuel cells, a current review. **Energies**, v.3, p.899-919, 2010.

FURLAN, D. A disponibilidade de óleo de soja para biodiesel. In: CONFERÊNCIA BIODIESELBR, 4., 2011, São Paulo. Palestras... Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/palestras/2011/>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

GAZZONI, D. L.; ÁVILA, M. T.; FELICI, P. H. N.; RALISCH, R. Balanço energético do biodiesel de dendê. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROENERGIA, 1., SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE BIOCMBUSTÍVEL, 1., 2008, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2008. 1 CD-ROM.

GAZZONI, D. L.; AZURDIA, I.; BLANCO, G.; ESTRADA, C. A.; MACEDO, I. C. **Sustainable energy in Latin America and the Caribbean: potential for the future**. Rio de Janeiro:Mexico, ICSU-LAC, 2010. v.3, 120p. Science for a Better Life: Developing Regional Scientific Programs in Priority Areas for Latin America and the Caribbean. Disponível em: <[http://www.icsu.org/icsu-latin-america/publications/reports-and-reviews/sustainable-energy/energy\\_english.pdf](http://www.icsu.org/icsu-latin-america/publications/reports-and-reviews/sustainable-energy/energy_english.pdf)>. Acesso em : 28 ago. 2012.

GAZZONI, D. L.; BORGES, J. L. B.; ÁVILA, M. T.; FELICI, P. H. N. Balanço energético da cultura da canola para a produção de biodiesel. **Espaço Energia**, v.11, p.24-28, 2009.

GAZZONI, D. L.; FELICI, P. H. N.; CORONATO, R. M. S.; RALISCH, R. Balanço energético das culturas de girassol e soja para produção de biodiesel. **Biomassa & Energia**,v.2, n.4, p.259-265, 2005.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. (Ed.) **Energia, meio ambiente, desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.

HALLENBECK, P. C. Microbial paths to renewable hydrogen production. *Biofuels*, v.2, n.3, p.285-302, 2011.

HANNON, M.; GIMPEL, J.; TRAN, M.; RASALA, B.; MAYFIELD, S. Biofuels from algae: challenges and potential. *Biofuels*, v.1, n.5, p.763-784, 2010.

HARNISH, F.; SCHRÖDER, U. Keeping intermediates on the track: towards tailored matabolons for bioelectrocatalysis. *Biofuels*, v.1, n.5, p.677-680, 2010.

HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, H. **Natural capitalism: creating the next industrial revolution**. Boston: Little Brown Company, 1999. 396 p.

HC Investimentos. PCA e IGP-M: Inflação histórica no Brasil. 2012. Disponível em: <<http://hcinvestimentos.com/2011/02/21/ipca-igpm-inflacao-historica/>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

HOOD, C. **Reviewing existing and proposed emissions trading systems**. Paris: OECD/IEA, 2010. IEA information paper.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados**. 2012. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtml>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **China's power sector reforms: where to next?** Paris: OECD/IEA, 2006a. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/chinapower.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **Cleaner coal in China**. Paris: OECD/IEA, 2009a. Disponível em: <<http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=355>>. Acesso em: 26 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion highlights (2011 edition)**. Paris: OECD/IEA, 2011a. 164p Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=1825](http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1825)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **Energy technology perspectives 2010**. Paris: OECD/IEA, 2010b. Disponível em: <[http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2010/etp2010\\_part1.pdf](http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2010/etp2010_part1.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **Energy technology perspectives 2010**. Paris: OECD/IEA, 2010c. Disponível em: <[http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2010/etp2010\\_part2.pdf](http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2010/etp2010_part2.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **Optimising russian natural gas: reform and climate policy**. Paris: OECD/IEA, 2006b. Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=1800](http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1800)>. Acesso em: 26 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **World energy outlook 2009**. Paris: OECD/IEA, 2009b. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppsum/weo2009sum.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **World energy outlook 2010**. Paris: OECD/IEA, 2010a. Disponível em: <[www.worldenergyoutlook.org](http://www.worldenergyoutlook.org)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IEA. International Energy Agency. **World energy outlook**. 2011. Paris: OECD/IEA, 2011b. Disponível em: <[http://www.iea.org/weo/docs/weo2011/es\\_portuguese.pdf](http://www.iea.org/weo/docs/weo2011/es_portuguese.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2011.

IMF. International Monetary Fund. **World economic outlook**. 2011. Disponível em: <<http://knoema.com/IMFWEO2011Sep>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Projeto Prodes: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite**. 2012. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Baseline scenarios**. 2007d. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/ch3s3-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch3s3-2.html)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007 Working Group III: mitigation of climate change**. 2007c. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/ch1s1-3.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch1s1-3.html)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Fourth assessment report: climate change 2007**. 2007b. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/mains3.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/mains3.html)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Overview**. 1990. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC\\_1990\\_and\\_1992\\_Assessments/English/ipcc\\_90\\_92\\_assessments\\_far\\_overview.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/English/ipcc_90_92_assessments_far_overview.pdf)>. Acesso em: 13 fev. 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Reports: Emissions scenarios**. 2007a. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=27#anc1>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

ITF. International Transport Forum. **Reducing transport greenhouse gas**

**emissions:** Trends & Data. 2010. Disponível em: <<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10GHGTrends.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797)

KAMBAM, P. K. R. K.; HENSON, M. Engineering bacterial processes for cellulosic ethanol production. *Biofuels*, v.1, n.5, p.729-743, 2010.

KOLCHIN, A.; DEMIDOV, B. Design of automotive engines. Moscow: Mir Publishers, 1984. 429 p.

LETTENS, S.; MUYS, B.; DELEUMANS, R.; MOONS, E.; GARCIA, J.; COPPIN, P. Energy budget and greenhouse gas balance evaluation of sustainable coppice systems for electricity production. *Biomass & Bioenergy*, v.24, p.179–197, 2003.

LORENZI, C. E. **Impactos ambientais e energéticos provocados pela substituição de motores de combustão interna por células a combustível em veículos automotores.** 2009. Dissertação (Mestrado), Centro Universitário do Instituto Mauá, São Caetano do Sul. Disponível em: <<https://www.google.com/url?q=http://www.maua.br/arquivos/dissertacao/h/314ba4ba794365429a4cee44b4df70a2&sa=U&ei=Y3oyUNYf49bRAaD4gPgl&ved=OCAoQFjAC&client=internal-uds-cse&usq=AFQjCNHRGUpNwHJhMo46Hg2H0sPc4rijTg>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass & Bioenergy*, v.32, n.4, p.582-595, 2008.

MADSEN, A. T.; SONDERGAARD, H.; FEHRMANN, R.; RIISAGER, A. Challenges and perspectives for catalysis in production of diesel from biomass. *Biofuels*, v.2, n.4, p.465-483, 2011.

MATTOS, L. B. R. A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa - o caso do município do Rio de Janeiro. 2001. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/lbrmattos.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

MENDES, E. F. **Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil.** 2004. Tese (Mestrado), UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/femendes.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

MOEHLENBROCK, M. J.; TOBY, T. K.; WAHEED, A.; MINTER, S. D. Metabolon catalyzed pyruvate air biofuels cell. *Journal of the American Chemical Society*, v.132, p.6288-6289, 2010.

NGUYEN, T. L. T.; GHEEWALA S. H.; GARIVAIT, S. Fossil energy savings and GHG mitigation potentials of ethanol as a gasoline substitute in Thailand. *Energy Policy*, v.35, p.5195-5205, 2007.

NOGUEIRA, L.A.H. (Ed.). **Bioethanol from sugarcane: energy for sustainable development.** Rio de Janeiro: BNDES/CGEE/ECLAC/FAO, 2008. 304 p. Disponível em: <<http://www.sugarcanebioethanol.org/en/download/bioetanol.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

NOGUEIRA, L.A.H. Does biodiesel make sense? *Energy*, v.36, p.3659-3666, 2011.

PACINI, H.; SILVEIRA, S. 2010. Ethanol or gasoline? Consumer choice in the face of different fuel pricing systems in Brazil and Sweden. *Biofuels*, v.1, n.5, p.685-695.

PULKRABEK, W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. 2. ed. New York: Prentice Hall, 2003. 504 p.

REBITZER G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T. SCHMIDT, W. P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.;

PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v.30, p.701–720, 2004.

REN2. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables global status report**. 2011. Disponível em: <[http://bit.ly/REN21\\_GSR2011](http://bit.ly/REN21_GSR2011)>. Acesso em: 28 fev. 2012.

RIFKIN, J. **The hydrogen economy**. New York: Tatcher/Penguin, 2002. 297 p.

SAE. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Brasil 2022**. 2010. Disponível em: <[http://www.sae.gov.br/site/wp-content/uploads/PlanoBrasil2022\\_web.pdf](http://www.sae.gov.br/site/wp-content/uploads/PlanoBrasil2022_web.pdf)>. Acesso em: 28 fev. 2012.

SALDIVA, P. H. N. O impacto do biodiesel na saúde da população. In: CONFERÊNCIA BIODIESELBR, 4., 2011, São Paulo. **Palestras...** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/palestras/2011/>>. Acesso em: 26 fev. 2012.

SCHIPPER, L. **Automobile Fuel: economy and CO<sub>2</sub> emissions in industrialized countries: troubling trends through 2005/6**. 2007. Disponível em: <<http://pdf.wri.org/automobile-fuel-economy-co2-industrialized-countries.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

SCHIPPER, L.; MARIE-LILLIU, C.; GORHAM, R. **Flexing the link between transport and greenhouse gas emission: a path for the World Bank**. Paris: IEA, 2000. Disponível em: <<http://www.ocs.polito.it/biblioteca/mobilita/FlexingLink1.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2012.

SEARCHINGER, T; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOGKOZ, S.; YU, T. H. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. **Science**, v.319, p.1238–1240, 2008.

SHEPHERD, M.; BARTLE, J.; LEE, D. J.; BRAWNER, J.; BUSCH, D.;

TURNBULL, P.; MACDONELL, P.; BROWN, T. R.; SIMMONS, B.; HENRY, R. Eucalyptus as a biofuels feedstock. **Biofuels**, v.2, n.6, p.639-657, 2011.

SLIVKA, R. M.; CHINN, M. S.; GRUNDEN, A. M. Gasification and synthesis gas fermentation: an alternative route to biofuels production. **Biofuels**, v.2, n.4, p.405-419, 2011.

SNEA. Sindicato Nacional das Empresas Aeroviárias. 2011. **Mercado doméstico: transporte aéreo de passageiros**. Disponível em: <<http://www.snea.com.br/images/analise%20setorial/Vis%C3%A3o%20SNEA%20-%20Merc%20%20Domestico%20Pax%20-%20OUT%202011.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

STREET, J.; YU, F. Production of high value products including gasoline hydrocarbons from the thermochemical conversion of syngas. **Biofuels**, v.2, n.6, p.677-691, 2011.

TANG, H., SALLEY, S. O.; SIMON, K. Y. Recent development in microalgae for biodiesel production. **Biofuels**, v.1, n.4, p.631-643, 2010.

TILMAN, D.; HILL, J.; LEHMAN, C. Carbon-negative biofuels from low-input high diversity grassland biomass. **Science**, v.314, p.1598–1600, 2006.

TUOMISTO, H. L.; HODGE, I. D.; RIORDAN, P.; MACDONALD, D. W. Comparing energy balances, greenhouse gas balances and biodiversity impacts of contrasting farming systems with alternative land uses. **Agricultural Systems**, v.108, p.42-49, 2012.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Background on the UNFCCC: The international response to climate change. 2012a. Disponível em: <[http://unfccc.int/essential\\_background/items/6031.php](http://unfccc.int/essential_background/items/6031.php)>. Acesso em: 29 ago. 2012.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change.

Baly road map. 2012b. Disponível em: <[http://unfccc.int/key\\_documents/bali\\_road\\_map/items/6447.php](http://unfccc.int/key_documents/bali_road_map/items/6447.php)>. Acesso em: 29 ago. 2012.

USDA. United States Department of Agriculture. Oilseeds: world market and trade. 2012. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2012.

VINUSELVI, P.; PARK, J. M.; LEE, J. M.; OH, K., GHIM, C.; LEE, S. K. Engineering microorganisms for biofuels production. *Biofuels*, v.2, n.2, p.153-166, 2011.

VON BLOTTNITZ, H.; CURRAN, M. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v.15, p.607–619, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606001016>>. Acesso em: 27 ago. 2012.

WANG, M.; WU, M.; HUO, H. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. **Environmental Research Letters**, v.2, n.2, p.1-13, 2007. Disponível em: <[http://iopscience.iop.org/1748-9326/2/2/024001/pdf/1748-9326\\_2\\_2\\_024001.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/2/2/024001/pdf/1748-9326_2_2_024001.pdf)>. Acesso em: 29 fev. 2012. Disponível em: <[http://iopscience.iop.org/1748-9326/2/2/024001/pdf/1748-9326\\_2\\_2\\_024001.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/2/2/024001/pdf/1748-9326_2_2_024001.pdf)>. Acesso em 10 ago. 2012.

WASHINGTON UNIVERSITY. ENVIR215. 2005. Disponível em: <<http://www.ocean.washington.edu/courses/envir215/energynumbers.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

WEISS, M. A.; HEYWOOD, J. B.; DRAKE, E. M. SCHAFFER, A.; AU-YEUNG, F. F. **On the Road in 2020: A life-cycle analysis of new automobile technologies**. 2000. Disponível em: <<http://web.mit.edu/energylab/www/pubs/el00-003.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

XIN, Z.; WANG, M. L. Sorghum as a versatile feedstock for bioenergy production. *Biofuels*, v.2, n.5, p.577-588, 2011.

ZHANG, M.; MALHI, S. S. Perspectives of oilseed rape as a bioenergy crop. *Biofuels*, v.1, n.4, p.621-630, 2010.

